

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра автоматизації та управління в технічних системах

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Олександр Ролік

« ____ » _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою «Інтегровані інформаційні системи»

зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

**на тему: «Система керування експериментальною установкою для
дослідження імпульсних високовольтних розрядів»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ІА-91мн

Адаменко Дмитро Андрійович _____

Керівник:

доцент, к.т.н., доц.,

Писаренко Андрій Володимирович _____

Рецензент:

доцент, к.т.н., доц.,

Ткач Михайло Мартинович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра автоматики та управління в технічних системах

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 126 «Інформаційні системи та технології»

Освітньо-наукова програма «Інтегровані інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр Ролік

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Адаменку Дмитру Андрійовичу

1. Тема дисертації «Система керування експериментальною установкою для дослідження імпульсних високовольтних розрядів», науковий керівник дисертації доцент, к.т.н., доц. Писаренко Андрій Володимирович, затверджені наказом по університету від «12» березня 2021 р. № 809-с

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження – експериментальна установка для дослідження імпульсних високовольтних розрядів.

4. Предмет дослідження – система керування експериментальною установкою для дослідження імпульсних високовольтних розрядів.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: опрацювання теорії предметної галузі, розроблення концепції, створення структурної схеми, створення моделі системи у відповідному програмному середовищі, створення математичної моделі на основі експериментальних даних.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: структурна схема, вигляд установки, теоретичний матеріал, створені моделі.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Система керування експериментальною установкою для дослідження імпульсних високовольтних розрядів / Адаменко Д. А., Писаренко А. В. // InfoCom Advanced Solutions. – 2021.

Модель системи керування експериментальною установкою для дослідження високовольтних розрядів та аналізу отриманих експериментальних даних / Адаменко Д. А., Писаренко А. В. // Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2021. – С. 67-78.

8. Дата видачі завдання 01.02.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Опрацювання теорії предметної галузі	04.02.2021-20.02.2021	
2.	Аналіз роботи установки	20.02.2021-01.03.2021	
3.	Розробка концепції системи	01.03.2020-06.03.2021	
4.	Створення структурної схеми	10.03.2020-18.03.2021	
5.	Проведення розрахунків	18.03.2021-02.04.2021	
6.	Створення моделі системи	02.04.2021-18.04.2021	
7.	Обробка експериментальних даних	18.04.2021-01.05.2021	
8.	Здача готової роботи	11.05.2021	

Студент

Дмитро Адаменко

Науковий керівник

Андрій Писаренко

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на здобуття ступеня «магістр» за освітньо-науковою програмою підготовки «Інтегровані інформаційні системи» на тему «Система керування експериментальною установкою для дослідження імпульсних високовольтних розрядів». Дисертація містить 142 сторінки, 55 рисунків, 3 таблиці, 3 додатки, 24 джерела.

Актуальність. У сучасному світі людство дуже залежне від електроенергії, майже жоден процес у наші часи не відбувається без використання електрики. Через значне використання енергії на Землі, постає проблема того, що вироблення електроенергії шкодить екології, забруднюючи навколишнє середовище, окрім цього значна частина енергії наразі виробляється з використанням повільно-відновлюваних ресурсів. Альтернативними є підходи класичної атомної енергетики, енергії сонця, вітру, води. Усі вони складають менше ніж 25% світового видобутку енергії. Не вивченою, але перспективною сферою є отримання енергії завдяки термоядерному синтезу. Роботи, що мають певний успіх, ведуться комерційною дослідницькою компанією у Києві. Для експериментів по ініціюванню термоядерної реакції використовуються установки, що ініціюють імпульсні високовольтні розряди, які, як показують експерименти, здатні забезпечити виділення енергії, що виникає в наслідок дії вищезгаданого імпульсу на тіло мішені. Дана робота присвячена створенню системи, що має допомогти поліпшити результативність роботи експериментальної установки.

Метою магістерської дисертації є збільшення енергії, що виділяється експериментальною установкою за рахунок автоматизації процесу вибору параметрів роботи установки.

Об'єктом дослідження є експериментальна установка для дослідження імпульсних високовольтних розрядів.

Предмет дослідження – система керування експериментальною установкою для дослідження імпульсних високовольтних розрядів.

Наукова новизна результатів, які отримані у ході роботи над магістерською дисертацією полягає у створенні системи, що зможе поліпшити крутизну переднього та заднього фронту імпульсу потужності високовольтного розряду шляхом утворення в діоді плазми за допомогою лазерів у потрібний момент часу та створенні системи, що оброблюватиме експериментальні дані для визначення у автоматизованих експериментах оптимального значення затримки спрацьовування лазерів та для вибору оптимального проміжку в діоді, що також регулюється розроблюваною системою.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи було опубліковано в матеріали коференцій:

Система керування експериментальною установкою для дослідження імпульсних високовольтних розрядів / Адаменко Д. А., Писаренко А. В. // InfoCom Advanced Solutions. – 2021.

Модель системи керування експериментальною установкою для дослідження високовольтних розрядів та аналізу отриманих експериментальних даних / Адаменко Д. А., Писаренко А. В. // Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2021. – С. 67-78.

Ключові слова: термоядерний синтез, високовольтний пробій, діод, катод, анод, лазер, плазма, модель, алгоритм обробки, експеримент, дані.

ABSTRACT

Master's dissertation for the degree of "master" in the educational and scientific training program "Integrated Information Systems" on "Control system of experimental setup for pulsed high-voltage discharges research." The dissertation contains 142 page, 55 figures, 3 tables, 2 appendices, 24 sources.

Relevance. In today's world, humanity is very dependent on electricity, almost no process today occurs without the use of electricity. Due to the significant use of energy on Earth, there is a problem that electricity generation is harmful to the environment, polluting the environment, in addition, a significant part of energy is currently produced using slow-renewable resources. Alternative approaches are classical nuclear energy, solar, wind, water. All of them account for less than 25% of world energy production. Not studied, but a promising area is the production of energy through fusion. The works, which have some success, are being conducted by a commercial research company in Kyiv. For experiments on the initiation of a thermonuclear reaction, installations are used that initiate pulsed high-voltage discharges, which, as experiments show, are able to provide the release of energy resulting from the action of the above-mentioned pulse on the target body. This work is devoted to the creation of a system that should help improve the performance of the experimental setup.

The purpose of the master's dissertation is to increase the energy released by the experimental installation by automating the process of selecting the parameters of the installation.

The object of research is an experimental setup for the study of pulsed high-voltage discharges.

The subject of research is the control system of an experimental installation for the study of pulsed high-voltage discharges.

The scientific novelty of the results obtained during the master's dissertation is the creation of systems that can improve the steepness of the leading and trailing edges of the high-voltage discharge pulse by forming a plasma diode with lasers at the right time and creating a system that will process experimental data. selection in automated experiments of the optimal value of the delay of lasers and for the selection of the optimal interval in the diode, which is also regulated by the developed system.

Approbation of dissertation results. The results of the work were published in conference proceedings:

Система керування експериментальною установкою для дослідження імпульсних високовольтних розрядів / Адаменко Д. А., Писаренко А. В. // InfoCom Advanced Solutions. – 2021.

Модель системи керування експериментальною установкою для дослідження високовольтних розрядів та аналізу отриманих експериментальних даних / Адаменко Д. А., Писаренко А. В. // Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2021. – Р. 67-78.

Keywords: thermonuclear fusion, high-voltage breakdown, diode, cathode, anode, laser, plasma, model, processing algorithm, experiment, data.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1 ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ	13
2 ОПИС ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ	15
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА	20
3.1 Концепція установки	20
3.2 Принципова схема подвійної формуїючої лінії	24
3.3 Формування імпульсу напруги на навантажені	30
3.4 Конструкція робочої зони експериментальної установки	35
3.5 Лазери	38
3.5.1 Обґрунтування вибору параметрів лазерів	43
3.5.2 Вибір лазерів	50
4 КОНЦЕПЦІЯ СИСТЕМИ	53
5 ОПИС СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ	56
6 ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ	60
6.1 Модель у вигляді передавальних функцій	64
6.2 Модель простору станів	69
6.3 Процесна модель	74
6.4 Поліноміальна модель	77
6.5 Нелінійна модель	83
6.6 Висновок розділу	91
7 АЛГОРИТМ ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ	93
8 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ MATLAB/SIMULINK	95
8.1 Оброблення експериментальних даних	95
8.2 Розроблення моделі у пакеті MATLAB/Simulink	101

8.3 Висновки до розділу.....	107
ВИСНОВКИ.....	109
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	112
ДОДАТОК А. Лістинг	115
ДОДАТОК Б. Структурна схема	123
ДОДАТОК В. Публікації.....	124

ВСТУП

Розроблювана система буде застосовуватись до проекту, який було розпочато, як наукове дослідження для розв'язання задачі ядерного синтезу з позитивним виходом енергії.

Одним з видів ядерного синтезу є термоядерний синтез, даний процес, наприклад, відбувається на зірках. Джерелом енергії горіння зірок є термоядерне згоряння речовини, при якому ядра гідрогену, що є легкими, зливаються та утворюють ядра інших хімічних елементів, що є більш важкими, – у ході такої реакції випромінюється вільна енергія.

На Землі вже було відтворено такий процес шляхом підриву водневої бомби, але існує проблема того, що не було винайдено методів для зменшення потужності такого процесу, аби зробити його контрольованим та придатним для використання у сфері енергетики. Наразі науці відомий тільки один метод підпалу речовини для термоядерної реакції – шляхом підриву атомної бомби, яку не можливо зробити малої потужності, через те, що для таких процесів існує поняття критичної маси. З 1951-го року розвивається тема керованого термоядерного синтезу, який би дозволив застосовувати процес ядерного горіння для енергетики [1].

Керований термоядерний синтез – синтез більш важких атомних ядер з більш легких з метою отримання енергії, який, на відміну від вибухового термоядерного синтезу, що використовується в термоядерних вибухових пристроях, носить керований характер. Керований термоядерний синтез відрізняється від традиційної ядерної енергетики тим, що в останній використовується реакція розпаду, в ході якої з важких ядер виходять більш легкі ядра [2].

Актуальність досліджень, про які йде мова вкрай висока, адже задача енергетики, – а саме виробництво електроенергії, має вирішуватись

економічними та екологічними шляхами. Розроблювана система покликана допомогти досягати кращих результатів в експериментах за рахунок регулювання процесу пробою діода.

Мета: збільшення енергії, що виділяється експериментальною установкою за рахунок автоматизації процесу вибору параметрів роботи установки.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні задачі:

- огляд предметної області;
- аналіз фізичних процесів, що протікають в установці;
- аналіз та оптимізація роботи установки;
- створення концепції системи;
- розроблення, описання та обґрунтування структурної схеми;
- аналіз лазерної техніки та визначення необхідних вимог до такої техніки;
- збір експериментальних даних, що є актуальними для даної дисертації;
- оброблення експериментальних даних та створення математичної моделі на їх основі;
- розроблення алгоритму збору та аналізу даних;
- створення моделі у MATLAB, що імітує роботу системи;
- оброблення та сортування даних, які були згенеровані створеною моделлю.

Поставлені задачі вирішувались завдяки методам:

- експерименту та спостереження;
- ідентифікації математичної моделі.

Об'єктом дослідження є експериментальна установка для дослідження імпульсних високовольтних розрядів.

Предмет дослідження – система керування експериментальною установкою для дослідження імпульсних високовольтних розрядів.

1 ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ

Атомні ядра складаються з двох типів нуклонів – протонів і нейтронів. Їх утримує разом так звана сильна взаємодія. При цьому енергія зв'язку кожного нуклона з іншими залежить від загальної кількості нуклонів в ядрі, як показано на рисунку 1.1.

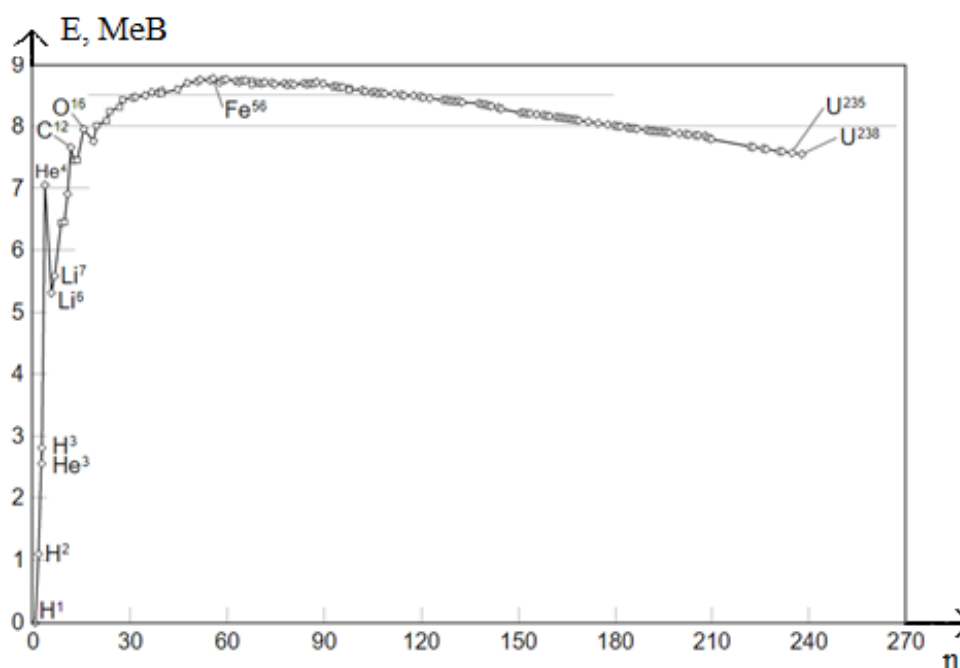


Рисунок 1.1 – Залежність енергії зв'язку нуклона (MeV) від числа нуклонів в ядрі [2]

З графіка видно, що у легких ядер зі збільшенням кількості нуклонів енергія зв'язку зростає, а у важких падає. Якщо додавати нуклони в легкі ядра або видаляти нуклони з важких атомів, то ця різниця в енергії зв'язку буде виділятися у вигляді різниці між витратами на здійснення реакції і кінетичної енергією частинок, що вивільняється. Кінетична енергія (енергія руху) частинок переходить в тепловий рух атомів після зіткнення часток з атомами. Таким чином ядерна енергія проявляється у вигляді нагріву [3].

Зміна складу ядра називається ядерним перетворенням або ядерною реакцією. Ядерна реакція зі збільшенням кількості нуклонів в ядрі називається термоядерною реакцією або ядерним синтезом. Ядерна реакція зі зменшенням кількості нуклонів в ядрі – ядерним розпадом або поділом ядра.

Протони в ядрі мають електричний заряд, а значить, відчують кулонівське відштовхування. В ядрі це відштовхування компенсується сильною взаємодією, що утримує нуклони разом. Але сильна взаємодія має радіус дії набагато менше кулонівського відштовхування. Тому для злиття двох ядер в одне потрібно спочатку їх зблизити, долаючи кулонівське відштовхування. Відомо кілька таких способів. У надрах зірок це гравітаційні сили. У прискорювачах – кінетична енергія розігнаних ядер або елементарних частинок. В термоядерних реакторах і термоядерній зброї – енергія теплового руху ядер атомів. У наш час гравітаційні сили не підконтрольні людині. Прискорення частинок настільки енергозатратно, що не має жодних шансів на позитивний енергобаланс. І тільки теплової метод виглядає придатним для керованого синтезу з позитивним виходом енергії [3].

2 ОПИС ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Згідно з фізичними законами, що лежать в основі явища та згідно теорії, що викладена у [1] процес, ініціацію якого має покращити розроблювана у даній роботі система, має наступну логіку.

Синергетичний процес колективного переродження ядер реалізується у природному ядерному горінні речовини. Таке горіння саме зароджується та саме собою підтримується в умовах продовження колапсу макроскопічної хвилі-оболонки, яка є сферичною та має екстремальну щільність речовини-енергії. У тілі вищезгаданої хвилі частки утворюють динамічну систему, що самоорганізовується у відповідь на спонтанне ініціювання та дію колективних домінуючих збурень, що самовідтворюються, нелінійно прогресують та створюють необхідні умови самопідтримуючого ядерного горіння та акумулювання енергії, що виділяється [1]. Алгоритм такого процесу наступний:

1. Макроскопічна порція речовини переходить у «колективізований» критичний стан, що характеризується когерентністю взаємодіючих у даний момент часу часток по радіальній координаті (у радіальному просторі) та значною корельованістю станів тих самих часток у двовимірному підпросторі кутових координат поверхні колапсуючої оболонки.
2. Збудження у тілі колапсуючої оболонки колективного екзоенергетичного детонаційно-акумулятивного ланцюгового електронно-нуклонно-ядерного процесу зміни системи зв'язків між початковими елементарними компонентами речовини, зміни власних основних станів цих компонентів у напрямі оптимізації самоорганізуючогося перехідного процесу «відображення» дії загального домінуючого обурення. Паралельно – саме обурення, проходяче через моношари речовини мішені (анода) послідовно

ініціює збудження макроскопічного ансамблю часток, що є сильно взаємодіючими та сильно корельованими та опиняються при проходженні через скануючу їх колапсуючу хвилю-оболонку спочатку (при проходженні через передній фронт хвилі щільності) в умовах колективного когерентного прискорення, а потім (при проходженні через задній фронт хвилі) – в умовах колективного когерентного гальмування, що і призводить до такої зміни зв'язків між елементарними компонентами речовини, або до такого переродження ядер в результаті якого :

- виділяється енергія, – відбувається ядерне горіння речовини, на задньому фронті хвилі щільності та накопичення екзоенергетичних продуктів такого процесу у тій частині об'єму, що вже була просканована;
- відбувається накопичення енергії, що виділилася, у ендоенергетичних продуктах ядерного переродження, утворюючих та поповнюючих масу речовини, що знаходиться у стаціонарному русі, який у свою чергу, формує пік колапсуючої хвилі щільності. Така хвиля переміщується з мінімальною дисипацією енергії до центру симетрії (точки сингулярності) процесу впродовж всього часу його еволюції в стадії імплузії.

Таким чином, сценарій відтворюваного процесу, що відповідає базовим гіпотезам, можна представити у вигляді послідовності ключових моментів, які, імовірно, є необхідними умовами штучно ініційованого ядерного горіння.

Перший крок. Потрібно виконати симетризований синхронний та синфазний ударний вплив великої потужності одночасно по всіх часткам поверхневого шару мішені (анода), що має центральну чи осьову симетрію, за допомогою низькоінерційного когерентного драйверу.

Другий крок. Як результат дії драйвера, відбувається зростання щільності речовини у тонкому поверхневому шарі мішені, в межах якого частки речовини отримують імпульс, напрямленого до центру мішені, руху. Отримуємо колапсуючу і по радіусу, і по товщині замкнена нелінійна хвиля щільності речовини-енергії.

Третій крок. Замкнутий шар часток переміщується до центру мішені, на його внутрішній поверхні відбувається ударне прискорення концентричних моношарів речовини. У термінах багато-зв'язкової динамічної системи, що оптимізується, це означає формування повторюваного загального домінуючого обурення, реакція на яке збурених часток (перехідний процес руху часток та значення їх фазових координат до нового врівноваженого стану) може бути представлена рівнянням

$$X(n+1) = F\{X(n), K(n)X(n)\}, \quad (2.1)$$

де:

$X(n) = \{x_1(n), x_2(n), \dots, x_L(n)\}$ – R-розмірний вектор ($R = \sum_i^L M_i$) множини

збуджених станів L часток;

$x_i - M_i$ –мірний вектор збуджень (збуджених фазових координат) i-тої часточки;

$K(n)$ – кососиметрична ($R \times R$) – матриця зв'язків між взаємодіючими елементами (матриця обміну збудженнями), коефіцієнти якої, розташовані симетрично відносно головної діагоналі, рівні за абсолютною величиною та протилежні за знаком, що забезпечує збереження сумарної енергії збудження;

n – дискретний час;

F – функція, що відображає хвильовий характер процесу переносу маси-енергії колапсуючою оболонкою, виконання законів збереження, неперервність та напрямленість процесу почергово зміщення моношарів, що скануються, до центру мішені.

Четвертий крок. Одночасно на передньому та на задньому фронті хвилі щільності ініціюється процес формування оптимальної структури зв'язків між часточкам.

Аналіз динамічної системи дозволяє побачити, що ефективна мінімізація інтегралу збуджень на інтервалі часу еволюції процесу може бути забезпечена встановленням між часточками таких зв'язків, які одночасно :

- мінімізують інерційність оболонки в цілому;
- максимізують повну масу речовини, що переноситься хвилею-оболонкою, за рахунок збільшення кількості часточок у ній.

Таким чином, слідування принципу динамічної гармонізації, який може бути інтерпретований, як принцип найменшої дії (принцип Мопертьюї) (принцип мінімуму (інтегралу) дії) або, як принцип мінімального вироблення ентропії Пригожина, розглянуті в контексті задачі оптимізації інерційності або оптимізації дефекту маси в динамічній системі, що утворена множиною інерційних елементів зі зв'язками між ними, здатне забезпечити самопідтримуючий тип ядерного перевлаштування у стійко колапсуючій хвилі екстремальної щільності речовини [1]. В процесі такої еволюції відбувається:

- екзоенергетичне переродження (ядерне спалювання) речовини тіла мішені;
- перетворення виділеної енергії ядерного горіння у внутрішню та кінетичну енергію продуктів ендоенергетичного ядерного переродження, що утворює пік хвилі.

Завершуюча (експлозивна) стадія процесу так само може бути проаналізована з позиції запропонованого вище підходу. Результат такого аналізу показує, що мінімум дисипації енергії, що виділяється у центрі мішені при руйнуванні структури оболонки може бути забезпечено за рахунок :

- поглинання максимальної кількості енергії, накопиченої хвилею ядерного горіння, ендотермічним процесом

фрагментації оболонки та народження таких ядер, питома енергія зв'язку яких нижча, ніж у ядер початкової речовини мішені;

- винесення надлишкової енергії з системи часточками, що слабо взаємодіють з речовиною;
- народження низькоентропійної хвилі переносу речовини-енергії з гарячої точки колапсу до поверхні вибухаючої мішені та далі – у зовнішнє середовище.

Якщо врахувати всі наведені вище базові гіпотези – то постає не проблема не легкого вибору драйвера, який би міг забезпечити потрібні характеристики. Вимоги до драйверу наступні:

- можливість швидкого досягнення високої об'ємної щільності підводимої потужності у поверхневому шарі мішені (ударність);
- синхронність та синфазність ударного впливу на великий ансамбль часточок (кількість яких має бути більшою за 10^{12} одиниць), що мало б забезпечувати когерентність.
- Досяжність сферичної або циліндричної симетрії ударного стискання мішені, що мало б забезпечувати концентричність процесу.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА

3.1 Концепція установки

Цикл формування прискорюючого імпульсу драйвера ShAD складається з двох етапів, що розрізняються, головним чином, часовими масштабами процесів, що відбуваються.

На першому етапі відбувається повільне накопичення енергії в конденсаторах і передача її в наступний щабель стиснення енергії і формування імпульсу необхідної (наносекундної) тривалості. У електрофізичних установках з що накопичують енергії в десятки - сотні кілоджоулів, цей процес відбувається в мікросекундному діапазоні. В цьому випадку еквівалентна схема установки може бути представлена елементами з зосередженими параметрами. У нашому випадку, електрична енергія накопичується в конденсаторах при напрузі до 100кВ і сумарною енергією до 60кДж. Потім, заряджені конденсатори комутуються послідовно і накопичена енергія, при напрузі в мегавольтній діапазоні закачується в ємність, що забезпечує більш щільне накопичення енергії в одиниці об'єму діелектрика і, відповідно, малі розміри накопичувача.

Для ShAD, еквівалентна схема, в першому наближенні, може бути представлена у вигляді:

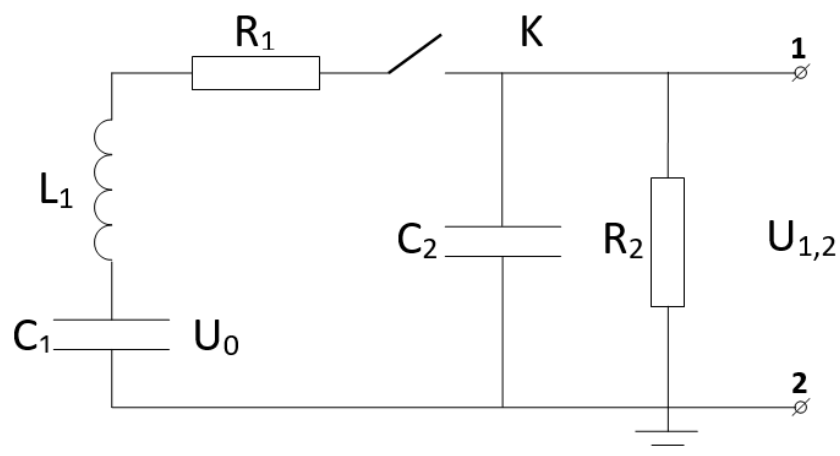


Рисунок 3.1. – Еквівалентна схема контуру заряду формуючої лінії ShAD

Тут c_1 – ємність генератору імпульсів напруги «в ударі», рівна 0.083 мкФ, L_1 і R_1 – індуктивність і опір втрат в генераторі Маркса. З попередніх даних, отриманих в випробуваннях блоку з двох конденсаторів і одного розрядника (еквівалент одного ступеня), L_1 і R_1 можна оцінити як 2,1 мкГн і 1.4 Ом відповідно. Більш точно ці величини визначимо, коли отримаємо першу якісну осцилограму коливань в короткозамкненому генераторі Маркса. c_2 – сумарна ємність заряджуваної подвійної формуючої лінії з водяним діелектриком, а R_2 – сумарний опір втрат у водяному діелектрику. Розрахункова сумарна ємність c_2 для ShAD дорівнює $37.5 \cdot 10^{-9}$ Ф, а R_2 дорівнює 200 Ом при питомому опорі води 1.0 Мом * см і 1000 Ом при 5.0 Мом * см.

Функція напруги на лінії (на ємності c_2) після замикання ключа К (розрядники генератору імпульсів напруги) для зазначених вище значень компонентів ланцюга, представлена на рисунку 3.2.

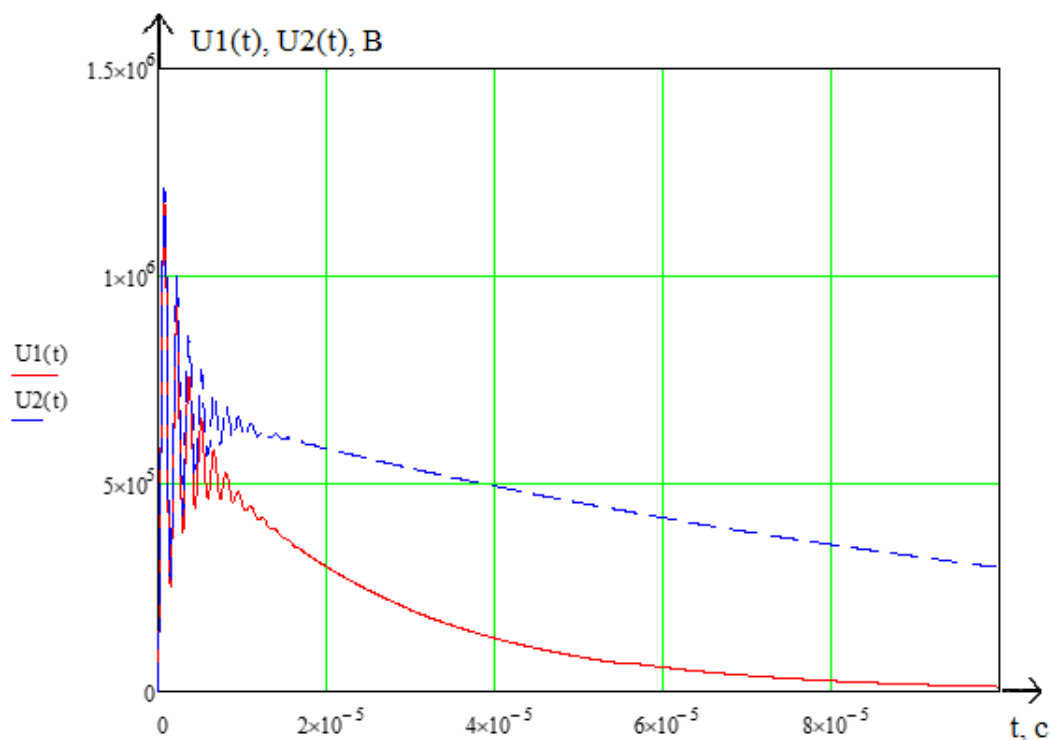


Рисунок 3.2 – Функції напруги на ПФЛ при входній напрузі генератора імпульсів напруги 1МВ

$U_1(t)$ відповідає опору втрат на лінії рівному 200 Ом , $U_2(t)$ – 1000 Ом , відповідно. Для практики значення має час заряду лінії до першого максимуму, тобто перший напівперіод коливань. На рисунку 3.3, у збільшеному масштабі представлено характеристики коливань поблизу першого максимуму.

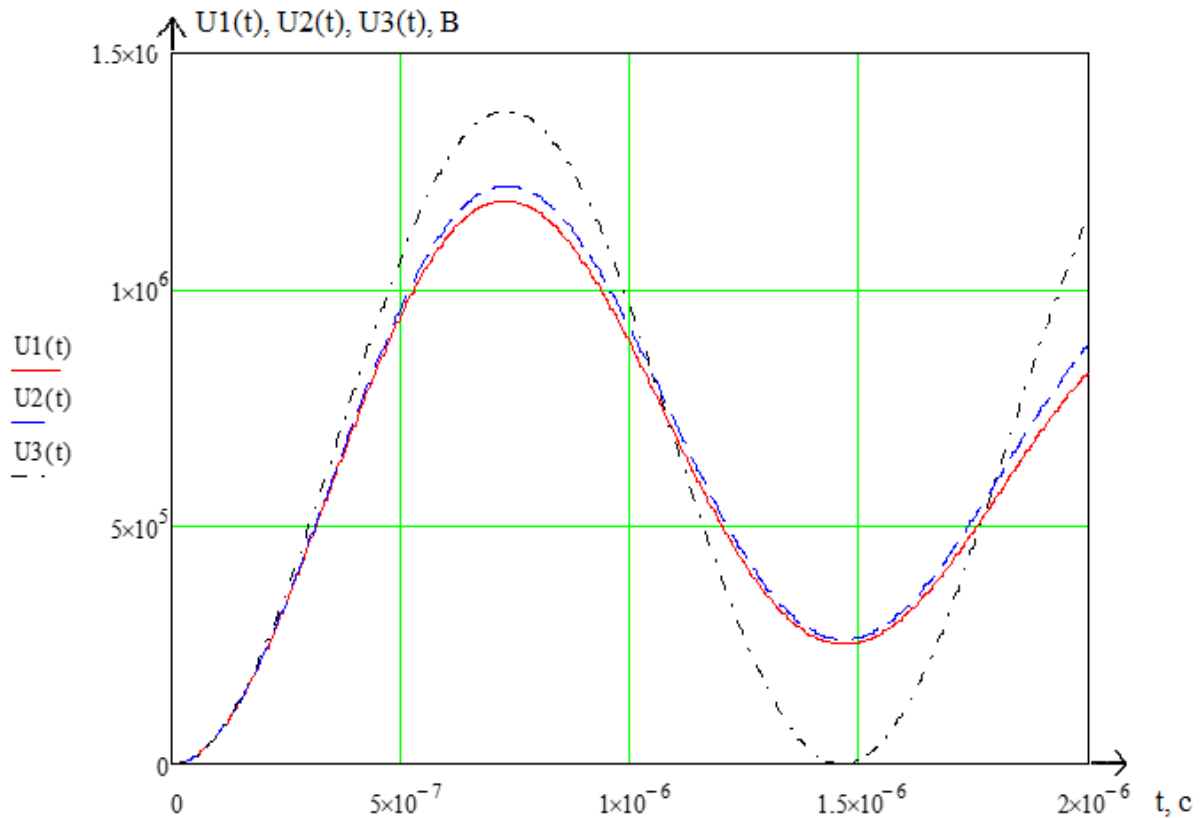


Рисунок 3.3. – Форми зарядної напруги на формуючій лінії. Цей рисунок, для порівняння, доповнений функцією $U_3(t)$, яка відповідає випадку, коли втрати в ланцюзі відсутні. В цьому випадку $R_1 = 0$, а $R_2 = 1.0\text{ Мом}$

У разі $R_2 = 200\text{ Ом}$, час наростання першого напівперіоду коливань становить: $7.28 \cdot 10^{-7}$ секунд до максимуму напруги. При цьому, максимальна напруга становить: $1.188 \cdot 10^6$ Вольт.

У разі $R_2 = 1000\text{ Ом}$, час наростання першого напівперіоду коливань становить: $7.35 \cdot 10^{-7}$ секунд до максимуму напруги. При цьому, максимальна

напруга становить: $1.22 * 10^6$ Вольт. Для функції $U_3(t)$ амплітуда зарядного напруги становить $1.38 * 10^6$ Вольт.

Таким чином, для отримання напруги на лінії 1 МВ, конденсатори генератора Маркса необхідно заряджати до ± 70 кВ, а для отримання 1.2 МВ – до, приблизно, ± 83 кВ. В цьому випадку, ефективність передачі енергії від генератора Маркса в лінію становить, приблизно, 65%. При відсутності втрат ефективність досягає 86%.

Представлена вище еквівалентна схема досить точно відображає процес заряду ємності генератором Маркса, зокрема, одинарної формуючої лінії. У разі подвійної формуючої лінії (лінія Блюмляйна) є особливість, пов'язана з тим, що ємність C_2 складається з ємностей двох паралельно заряджуваних ліній, які перемикаються послідовно при спрацьовуванні комутаторів в одній з ліній, при формуванні головного імпульсу. У ShAD лінії розташовані співвісно і вставлені одна в іншу для компактності загальної конструкції. Для забезпечення заряду внутрішньої лінії один з її електродів повинен бути заземлений. Але, оскільки при спрацьовуванні комутаторів у зовнішній лінії, на цьому електроді виникає головний імпульс, який передається в навантаження, електрод на цьому етапі повинен бути від'єднаний від землі. Цю компромісну задачу виконує індуктивність. Ця індуктивність повинна забезпечувати низький імпеданс при заряді внутрішньої лінії і мати достатній імпеданс, щоб не шунтувати вихідний імпульс [1].

Уточнена еквівалентна схема зарядного ланцюга ShAD представлена на рисунку 3.4.

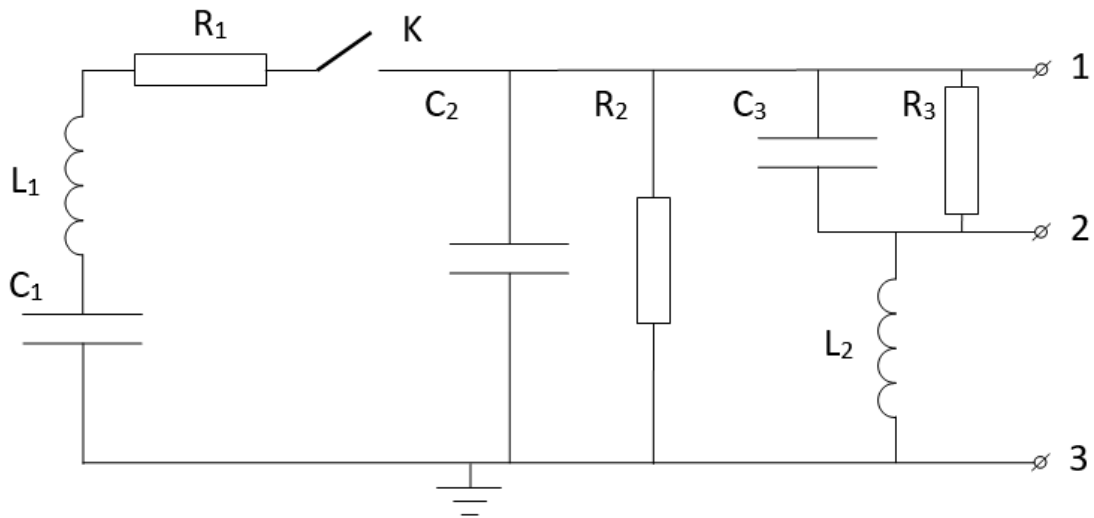


Рисунок 3.4 – Уточнена еквівалентна схема ланцюга заряду ПФЛ ShAD.

Тут c_2 – ємність зовнішньої лінії, c_3 – ємність внутрішньої лінії, R_2 і R_3 – опори втрат в лініях, відповідно, L_2 – заземлююча індуктивність. Головний, вихідний, імпульс ПФЛ з'являється на індуктивності L_2 (вихідні клеми 2 та 3). Наявність другої індуктивності призводить до того, що максимуми напруги на ємностях c_2 і c_3 досягаються не в один момент. В цьому випадку, оптимальним моментом включення комутаторів в лінії буде момент досягнення максимуму сумарної енергії в двох коаксіалах ПФЛ. Крім того, при протіканні зарядного струму, на цій індуктивності виникає передімпульс, який надходить на катод діода. Щоб позбутись цього паразитного явища використовується спеціальний розрядник.

3.2 Принципова схема подвійної формуючої лінії

Найпростішими пристроями, що формують імпульс напруги на навантаженні, є лінії (одинарні та подвійні). Високовольтний імпульс для живлення сильнотрумного діода установки ShAD створюється в подвійній формуючій лінії (ПФЛ), що представлена на рисунку 3.4.

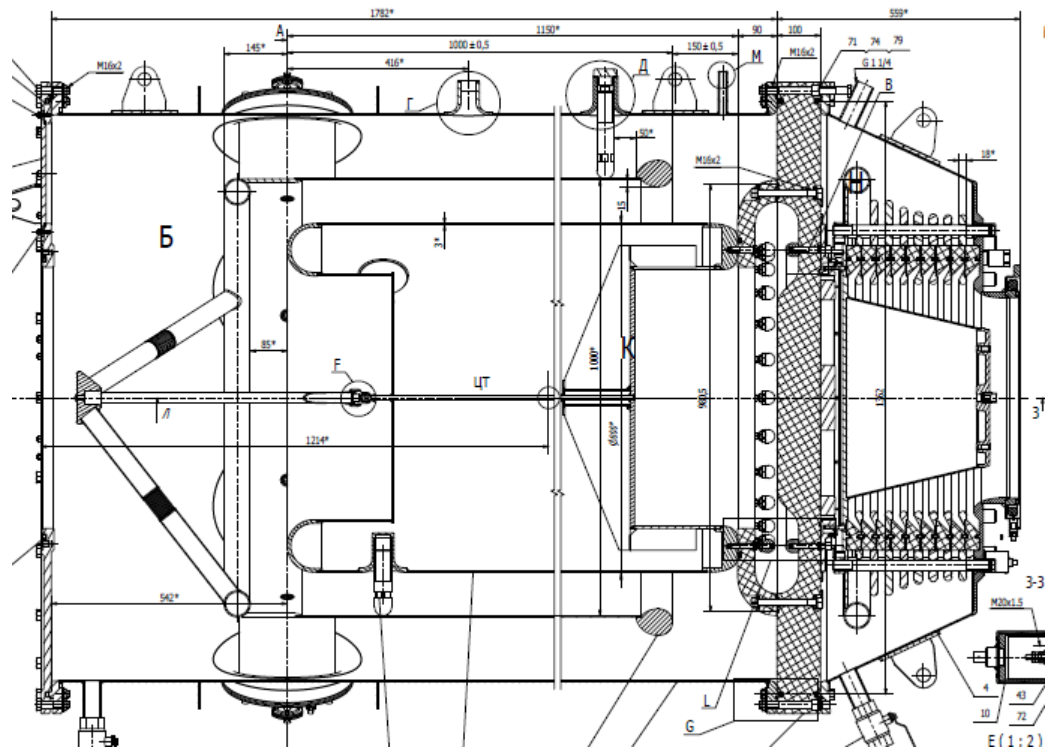


Рисунок 3.4 – Ескіз ПФЛ установки

Схематично структура ДФЛ та розрядників, що керують ініціацією поширення імпульсів напруги по лініям ДФЛ показана на рисунку 3.5.

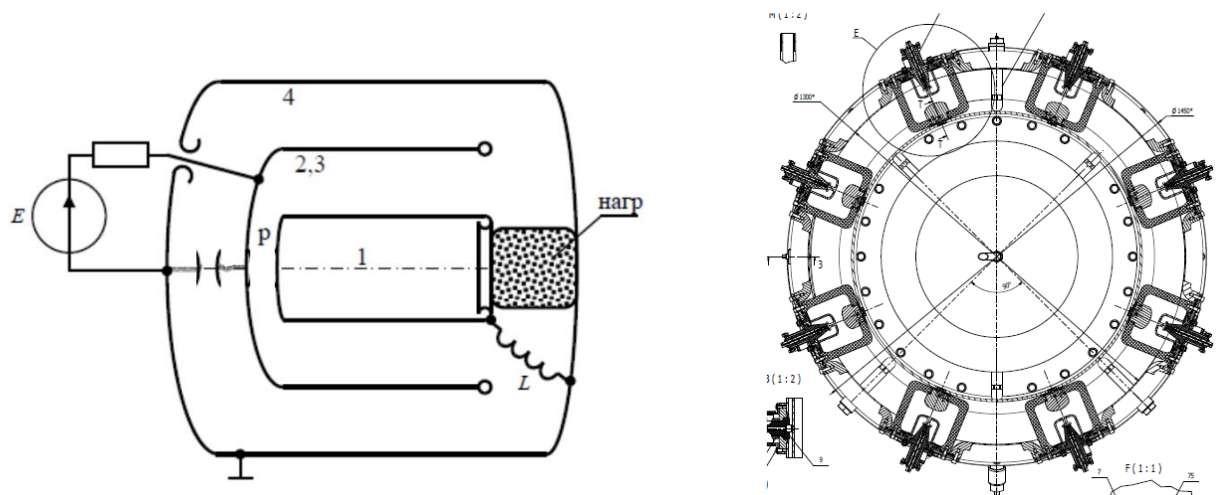


Рисунок 3.5 – Структура ПФЛ і керуючих розрядників.

Подвійна формуюча лінія складається з двох коаксіальних ліній. Кожна лінія складається з двох циліндричних поверхонь – одна поверхня під високим

потенціалом, а друга поверхня – заземлена. У ПФЛ конструктивно одна лінія вставлена у другу, таким чином, що циліндричні поверхні під високим потенціалом об'єднані в одну. Діаметр внутрішнього циліндра $D_1=800$ мм, діаметр середнього (високовольтного) циліндра $D_2=1000$ мм ($D_2 = D_3$), діаметр зовнішнього циліндра $D_4 = 1300$ мм. Внутрішня лінія – лінія між коаксиальними циліндрами D_4 і D_3 , внутрішня лінія – лінія між циліндрами з діаметрами D_1 і D_2 .

Цикл формування ускорюючого імпульсу драйвера ShAD на базі ПФЛ складається з двох етапів. На першому етапі відбувається повільне накопичення енергії в конденсаторах, і передача її в наступну ступінь стискання енергії та формування імпульсу наносекундної тривалості. На цьому етапі зарядки еквівалентна схема встановлення може бути представлена елементами із зосередженими параметрами (рисунок 3.3). Початкова електрична енергія накопичується в конденсаторах при напрузі до 100 кВ і сумарною енергією до 60 кДж.

На другому етапі заряджені конденсатори комутуються послідовно і накопичена енергія, при напрузі в мегавольтному діапазоні закачується в ємність, забезпечуючи велику щільність накопиченої енергії в одиниці об'єму діелектрика і, відповідно, малі розміри накопичувача.

Схема на рисунку 3.3 описує етап зарядки ПФЛ і на цьому етапі можна обмежитись лише зосередженими елементами.

На етапі формування імпульсів необхідно враховувати разом з зосередженими елементами і розподілені елементи, що описують поширення хвиль в коаксіальних лініях. Етап починається після спрацьовування комутаторів (8-канального розрядника).

Після початку комутації 8-канального розрядника починається формування імпульсу напруги на навантаженні в результаті поширення імпульсів різниці потенціалів по лініях і відображенні імпульсів в області неузгодженості імпедансів на кордоні ПФЛ і діода.

На рисунку 3.6 зображена принципова схема для стадії формування імпульсу на навантаженні в системі з трьома електродами.

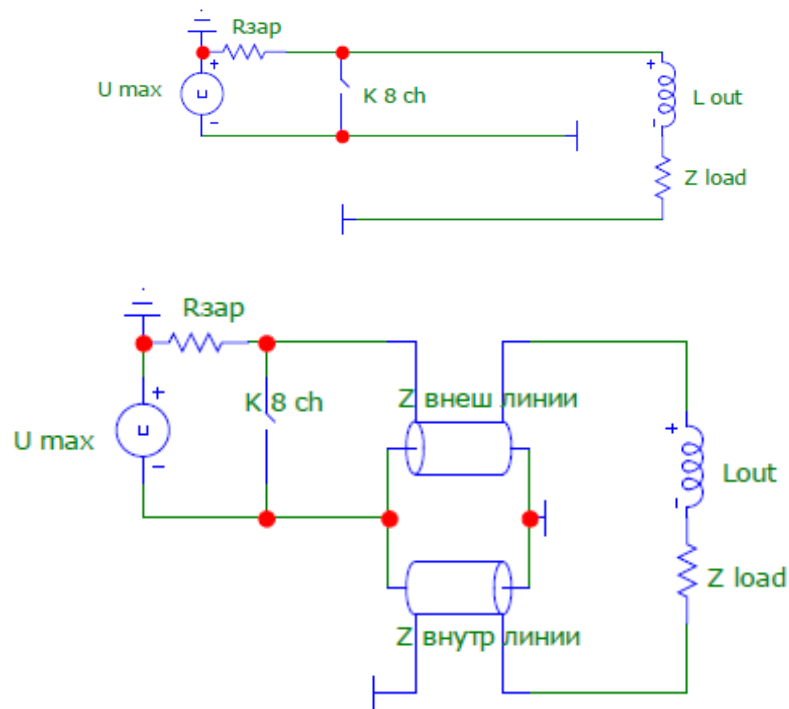


Рисунок 3.6 – Схема ПФЛ з коаксіальних вкладених циліндрів

На лівій схемі лінії умовно представляються областями між відрізками. На правому малюнку коаксіальні лінії відображаються стандартними елементами ліній передачі з високовольтними центральними електродами (загальними для двох ліній в даній реалізації) і оточуючими їх поверхнями. Тут L_{out} індуктивність вихідного ізолятора, а Z_{load} – імпеданс навантаження (імпеданс діода).

Режим формування імпульсу запускається після комутації розрядників, які, як видно з рисунку 3.5, стоять у зовнішній лінії і, отже, імпульс напруги після початку комутації починає свій рух по зовнішній лінії.

При такому русі зовнішня лінія навантаження і внутрішня лінія (розімкнена на дальньому кінці) для рухомого імпульсу включені послідовно. Джерелами хвиль, що поширюються потім по двом коаксіальним лініях, є області комутації між високовольтним електродом і заземленим електродом (див. рисунок 3.5).

Хвилі в лінії з радіусом R_{coax} та довжиною вздовж осі l_{coax} розповсюджуються зі швидкістю $c_{line} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$ одночасно по куту φ та вздовж осі ліній z . Оберт на кут 2π відбувається за час $t_{2\pi} = \frac{2\pi R_{coax}}{c_{line}}$. Час розповсюдження вздовж лінії дорівнює $t_i = \frac{l_i}{c_{line}}$ і за цей час хвиля повертає на кут $\Delta\varphi = \frac{l_i}{2\pi R_{coax}} + \Delta\varphi_i$.

Тут враховано, що якщо хвиля збуджується в малій області по куту, то кут повороту для кожної хвилі має початкову фазу області збудження хвилі $\Delta\varphi_i = \frac{2\pi}{N}(i-1)$, де N – число точок збудження хвилі, i – номер області збудження хвилі $i=1, \dots, N$.

Хвилі від кожної точки збудження розповсюджуються за коаксіальною лінією незалежно та визначаються вкладом у потенціал: $U_{chanal}(z, t, U_{amp}, R_{coax}, l_{coax}, \tau_{eff}, \Delta\varphi)$, де $\Delta\varphi_{chanal}$ – початкова фаза кожного каналу розрядника, яка визначається місцем розположення розрядника, а τ_{eff} – ефективний час комутації розрядника.

Для кожного з N розрядників: $\Delta\varphi_{ichanal} = \frac{1}{N}(i-1)$, $i=1, 1, \dots, N$. Функція $f_\tau(z, \tau_{eff})$ – визначається моделлю комутації розрядників (зазвичай експонентний фронт ступінчастої функції з характерними часом комутації розрядника) і формується, що рухається уздовж лінії імпульс має вигляд солітону в формі «сходінки»:

$$U_{chanal}(z, t, R_{coax}, \tau_{eff}, \Delta\varphi) = U_{amp} \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \left(\exp \left(- \left(\frac{(z + \Delta\varphi R_{coax}) - c_{line} t}{c_{line} \tau_{eff}} \right) \right) \right). \quad (3.1)$$

Сумарне поле в k -ій лінії U_k дорівнює сумі вкладів від кожної області збудження:

$$U_k(t) = \sum_{i=1}^N U_{chanal}(z, t, R_{kcoax}, \tau_{ieff}, \Delta\varphi_i). \quad (3.2)$$

Ефективний час комутації (зміна опору в e кількість разів) τ_{eff} складається з двох компонентів, індуктивного та резистивного. Індуктивна компонента оцінюється так $\tau_L = \frac{1}{N} \frac{L}{Z}$, де L – індуктивність каналу іскри, Z – імпеданс комутованої структури, N – число повноцінних іскрових каналів. Індуктивність одного каналу іскри оцінюється як $\tau_L = \frac{1}{N} \frac{L}{Z}$, де d – довжина іскри в см. В нашому випадку, $d = 3$ см, тобто $L=42$ нГн на канал.

Резистивна компонента оцінюється співвідношенням $\tau_R = 88d^{1/3} \frac{1}{Z^{1/3}} \frac{1}{E^{4/3}} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \frac{1}{N^{1/3}}$, де E – середня напруженість поля в міжелектордному проміжку діода в 10 кВ/см. Таким чином, маємо вираз для ефективного часу комутації: $\tau_{eff}(N) = \sqrt{\tau_R^2 + \tau_L^2}$ [1].

Наприклад, при проміжку у 3.0 см и напругою на розряднику 1 МВ, $E = 33,33 \dots, \frac{\rho}{\rho_0}$ – відношення щільності газу у розряднику до щільності поза ним.

Розрахунковий імпеданс комутованої зовнішньої лінії установки рівний :

$$Z_{line} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \text{Log} \left(\frac{D_4}{D_3} \right) \approx 1,72 \text{ Ом.}$$

Таким чином, для комутатора зі 1, 3, 6, 8 синхронними каналами, довжина фронту хвилі, що підходить до діода може складати $\tau(1) = 54.072$ нс, $\tau(3) = 18.408$ нс, $\tau(6) = 9.572$ нс, $\tau(8) = 7.386$ нс.

Чим більше кількість точок збудження, тим ближче сумарне поле до поля плоскої одновимірної хвилі, що розповсюджується по осі системи. Через несинхронне спрацьовування розрядників зменшується ефективна кількість розрядників зменшується і, в результаті, збільшується ефективний час комутації, а відповідно до вираження для сумарного поля U_k підвищується немонотонність сигналу від часу.

В установці лінії наповнені дистильованою водою і наближено швидкість поширення ЕМ збуджень по лінії дорівнює $c_{line} \approx 0.033$ м/нс.

Наведені вище фізичні процеси можна врахувати в модифікованій принциповій схемі ПФЛ (рисунок 3.7), в якій кожен розрядник і порушувані їм хвилі описуються окремим ланцюгом.

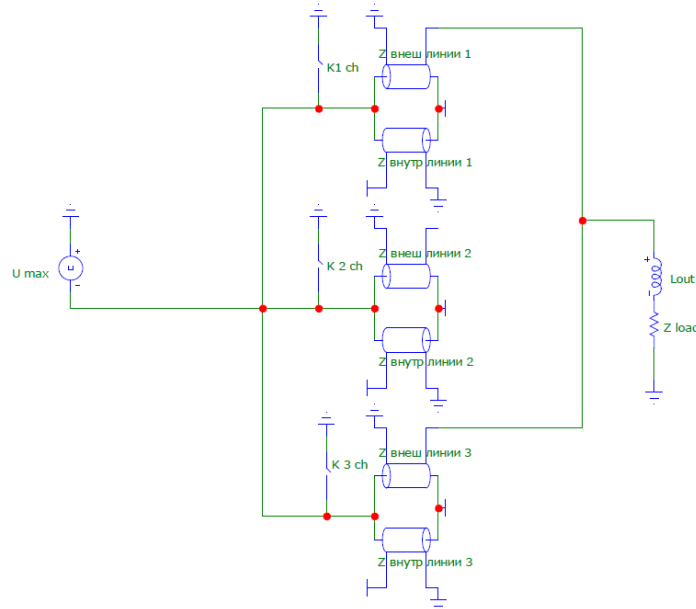


Рисунок 3.7 – Схема подвійної формуючої лінії з коаксіальних вкладених циліндрів з урахуванням багатоканального розрядника.

Зображено схему з трьома працюючими каналами розрядника і, відповідно трьома точками збудження хвиль в лініях. У кожного каналу свій момент включення комутації, свій ефективний час спрацьовування і своя початкова фаза яка ініціюється розрядником хвилі в лініях.

3.3 Формування імпульсу напруги на навантаженні

Проаналізуємо якісну картину формування імпульсів в ПФЛ без урахування розкиду параметрів в каналах. Уявімо картину формування імпульсу напруги в ПФЛ для одного каналу розрядника.

Перед початком комутації разрядником лінії і їх еквівалентні ємності заряджені до максимального потенціалу U_{amp} . Різниця потенціалів на навантаженні дорівнює:

$$U_{load} = U_2(t, z = l_{line}) - U_1(t, z = l_{line}) = U_{amp} - U_{amp} \approx 0. \quad (3.3)$$

Схематично початковий стан ПФЛ показано на рисунку 3.8, зліва – зовнішня лінія, потім – навантаження, а потім – внутрішня лінія.

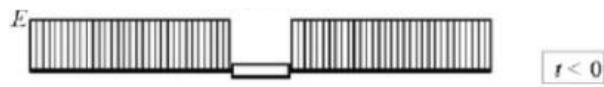


Рисунок 3.8 – Кінцева стадія зарядки двох ліній.

За початок комутації оберемо $t_0 = 0$. Довжина лінії 100 см та час проходження по лінії $t_{tr} = l_{line} / c_{line} \approx 30$ нс. Розглянемо наступні інтервали часу.

Інтервал часу $0 < t < t_{tr}$:

На початку цього інтервалу часу починається комутація з характерним часом і починає свій рух імпульс. Якісно цей процес відображений на рисунку 3.9.

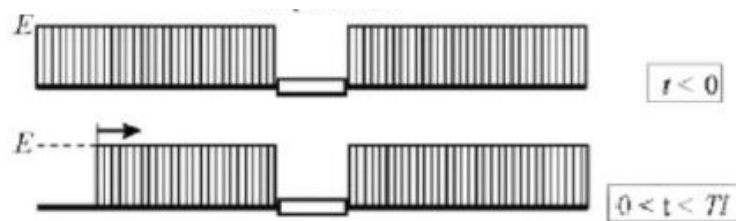


Рисунок 3.9 – Розповсюдження імпульсу від комутатора до навантаження

По зовнішній лінії починає свій рух до навантаження негативний імпульс напруги, який в максимумі досягає значення $-U_{amp}$ і має форму сходинки:

$$U_{1ch}(z,t) = -U_{amp} \left(\frac{2}{\pi} \operatorname{Arctg} \left(\exp \left(- \left(\frac{z - c_{line} t}{c_{line} \tau_{eff}} \right) \right) \right) \right). \quad (3.4)$$

Форма зміни імпульсу з часом в точці розташування навантаження має форму $U_{1ch}(l_{line}, t) = -U_{amp} \left(\frac{2}{\pi} \operatorname{Arctg} \left(\exp \left(- \left(\frac{t_{line} - t}{\tau_{eff}} \right) \right) \right) \right)$, його вид показано на рисунку 3.10

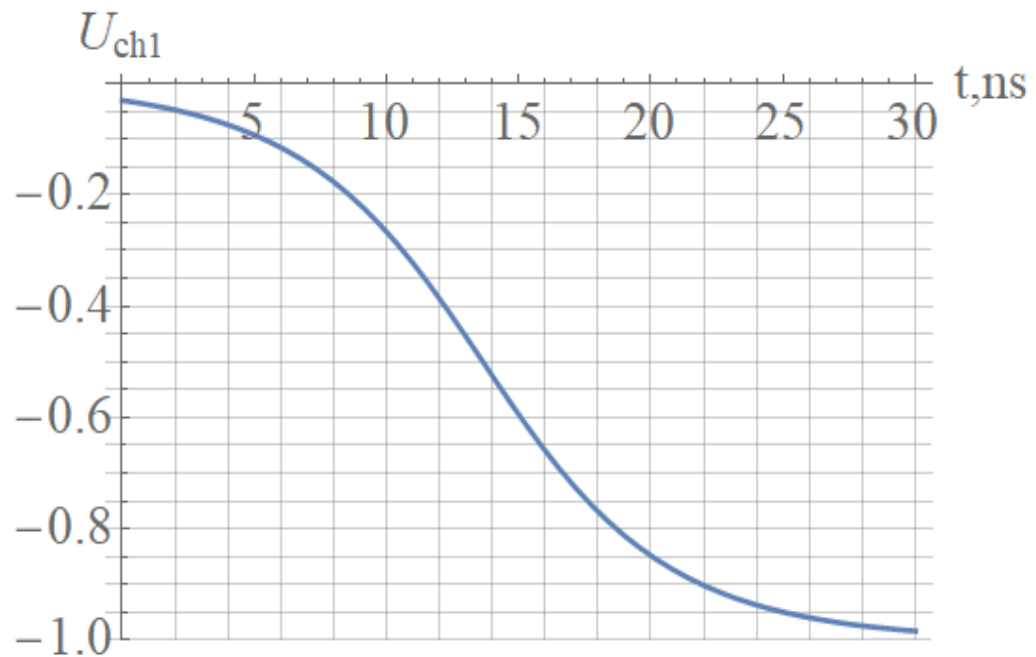


Рисунок 3.10 – Імпульс у точці положення навантаження

З урахуванням біжучої хвилі негативної полярності, показаної вище, в першій лінії різниця потенціалів виявляється рівною (рисунок 3.11):

$$U_1(z,t) = U_{amp} + U_{1ch}(z,t) = U_{amp} \left(1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{Arctg} \left(\exp \left(- \left(\frac{z - c_{line} t}{c_{line} \tau_{eff}} \right) \right) \right) \right). \quad (3.5)$$

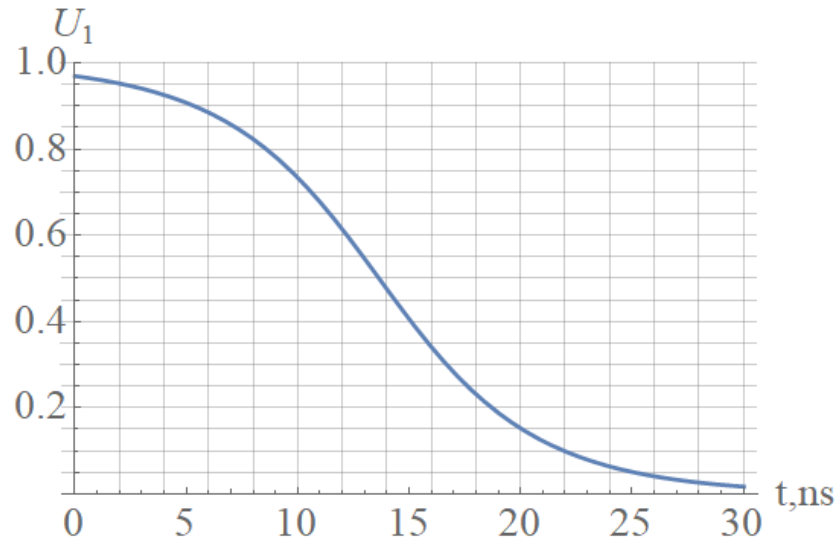


Рисунок 3.11 – Різнісність потенціалів у першій лінії

У міру просування імпульсу негативної полярності потенціал в лінії стає нулем. Друга лінія в цьому інтервалі часу як і раніше заряджена до максимального потенціалу $U_2(z, t) = U_{amp}$, а різниця потенціалів на навантаженні дорівнює:

$$U_{load} = U_2(t, z = lline) - U_1(t, z = lline) =$$

$$= U_{amp} \left(1 - \left(1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{Arctg} \left(\exp \left(- \left(\frac{t_{tr} - t}{\tau_{eff}} \right) \right) \right) \right) \right) = U_{amp} \frac{2}{\pi} \operatorname{Arctg} \left(\exp \left(- \left(\frac{t_{tr} - t}{\tau_{eff}} \right) \right) \right) \quad (3.6)$$

і відхиляється від нуля тільки при досягненні правої межі інтервалу.

Інтервал часу $t_{tr} < t < 2t_{tr}$:

Імпульс від'ємної полярності дійшовши до навантаження частково відбивається з коефіцієнтом відбиття k_{ref} і рухається назад по 1-шій лінії з амплітудою $U_{2amp} \approx -k_{tr} U_{amp}$. Якість руху імпульсів по першій і другій лініям в цьому інтервалі показані на рисунку 3.13.

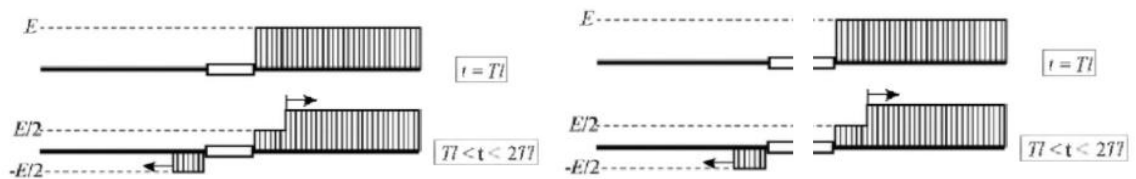


Рисунок 3.13 – Рух імпульсів

Імпульс, що рухається по першій, вже розрядженій лінії, має форму:

$$U_1(z, t) = -k_{ref} U_{amp} \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \left(\exp \left(- \left(\frac{z + c_{line} t}{c_{line} \tau_{eff}} \right) \right) \right).$$

По другій зарядженій лінії рухається імпульс від'ємної полярності:

$$U_{2ch}(z, t) = -k_{tr} U_{amp} \left(\frac{2}{\pi} \text{Arctg} \left(\exp \left(- \left(\frac{z - c_{line} t}{c_{line} \tau_{eff}} \right) \right) \right) \right),$$

який призводить до наступного розподілення потенціалу по другій лінії:

$$U_2(z, t) = \left(1 - k_{tr} \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \left(\exp \left(- \left(\frac{z - c_{line} t}{c_{line} \tau_{eff}} \right) \right) \right) \right) U_{amp}.$$

Різниця потенціалів на навантаженні в цьому інтервалі має вигляд:

$$U_{load} = U_2(l_{line}, t) - U_1(l_{line}, t) = \left(1 - k_{tr} \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \left(\exp \left(- \frac{t_{tr} - t}{\tau_{eff}} \right) \right) \right) + k_{ref} \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \left(\exp \left(- \frac{t_{tr} + t}{\tau_{eff}} \right) \right) U_{amp}$$

з амплітудою $(1 - k_{tr} + k_{ref}) U_{amp}$.

Інтервал часу $2t_{tr} < t < 3t_{tr}$

Імпульси, що пройшли до моменту $2t_{tr}$ – кожний свою лінію, знову відбиваються, змінюючи знак амплітуди та рухаються до навантаження.

Картина руху імпульсів показана на рисунку 3.14.

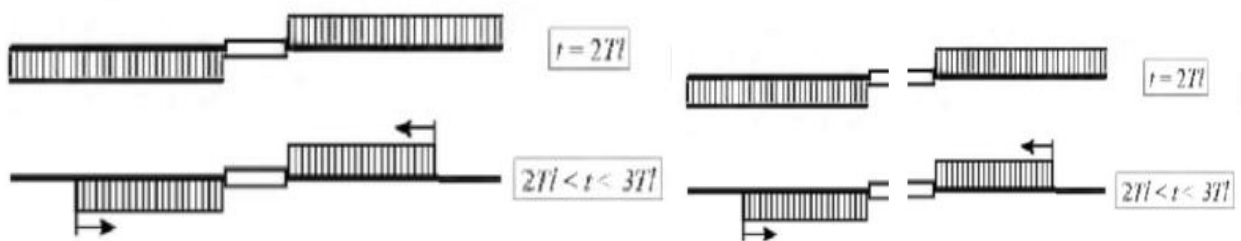


Рисунок 3.14 – Рух імпульсів

В першій лінії $U_1(z, t) = -k_{tr} U_{amp} + k_{ref} U_{amp} \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \left(\exp \left(- \left(\frac{z - c_{line} t}{c_{line} \tau_{eff}} \right) \right) \right).$

В другій лінії $U_2(z, t) = (1 - k_{tr})U_{amp} - k_{ref}U_{amp} \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \left(\exp \left(- \left(\frac{z + c_{line}t}{c_{line}\tau_{eff}} \right) \right) \right)$.

За імпульсами напруга нуль, а на навантаженні :

$$U_{load} = U_2(z, t) - U_1(z, t) = U_2(l_{line}, t) - U_1(l_{line}, t) = \\ = \left(1 - k_{ref} \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \left(\exp \left(- \frac{t_{tr} + t}{\tau_{eff}} \right) \right) - k_{ref} \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \left(\exp \left(- \frac{t_{tr} - t}{\tau_{eff}} \right) \right) \right) U_{amp}$$

аж до впливу фронтів хвилі $\approx U_{amp}$.

Після проходження цього інтервалу часу маємо напругу на навантаженні $U_{load} = U_2(l_{line}, t) - U_1(l_{line}, t) = (1 - k_{tr}) - k_{ref} + k_{tr} - k_{ref} \approx 0$ та весь процес формування імпульсу на навантаженні закінчується [1].

3.4 Конструкція робочої зони експериментальної установки

На рисунку 3.15 – зображено креслення області, де відбувається власне електричний пробій діода. Сам проміжок діода знаходиться на рівні нижніх діагностичних вікон. Зверху анод, як видно з креслення – над ним є простір, що дозволить виконувати переміщення анода вздовж осі діода. Це потрібно для тестування різних варіацій зазору. Простору достатньо для встановлення двигуна та власне самого переміщення.

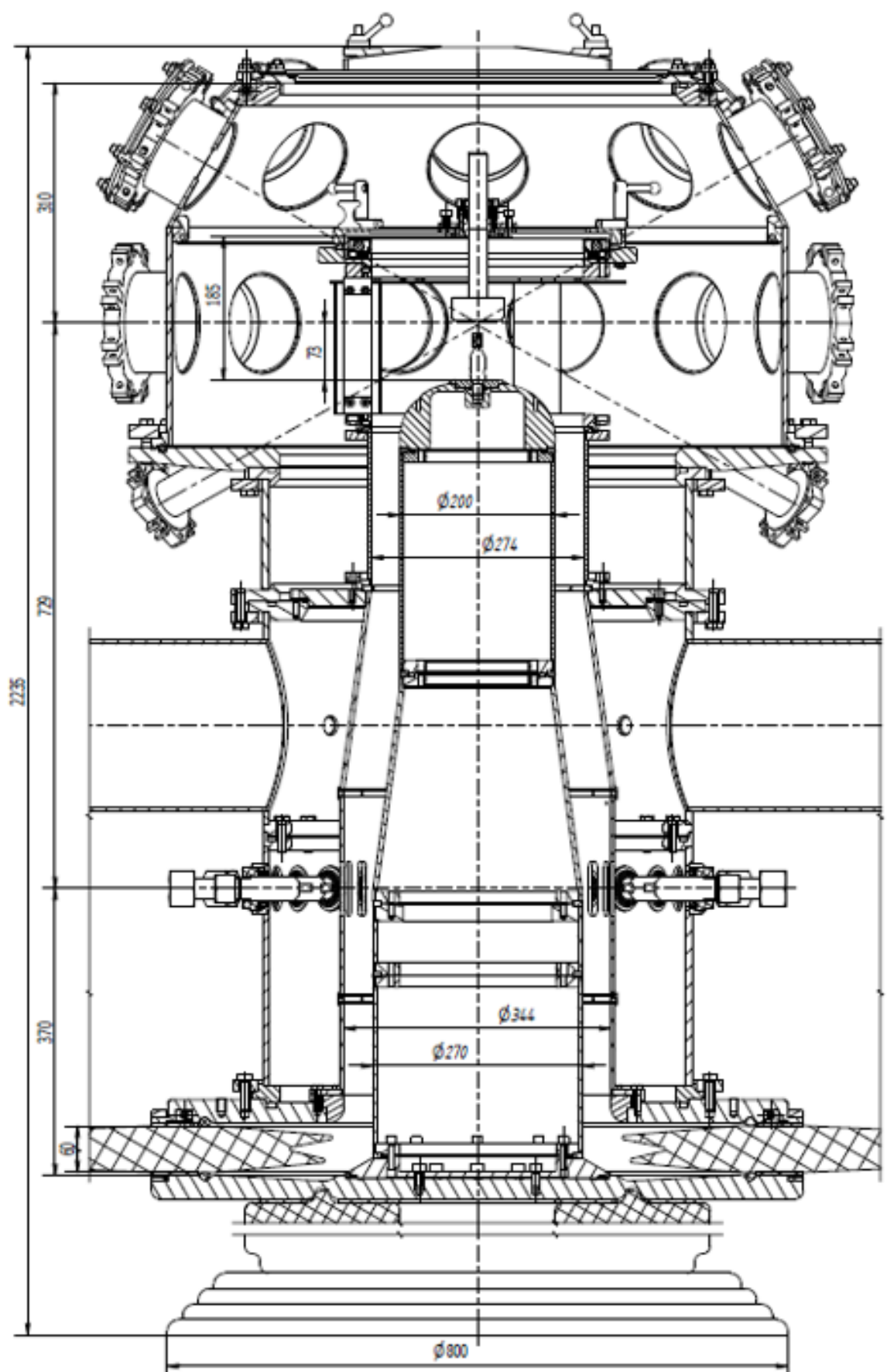


Рисунок 3.15 – Креслення області, де знаходиться діод та куди буде заведено лазери

Оскільки, як зазначатиметься далі в роботі, немає необхідності виконувати переміщення більше, аніж на кілька сантиметрів. Знизу – катод. Було прийняте рішення виконувати переміщення аноду, оскільки все живлення та масивні елементи конструкції з'єднані з катодом, в наслідок чого його переміщення вздовж осі є неможливим, або необґрунтовано трудоємним у реалізації.

Діагностичні вікна (всі отвори, що зображено на кресленні) використовуються для технічних завдань. Через ці отвори можливо заміряти необхідні показники. Під час експериментів фіксуються спектрограми, рентгенограми, вимірюються температура і тд. Також через ці отвори буде заведено оптику, що дозволить опромінювати потрібні частини діода. Подробиці цього опромінення викладені у наступних розділах, воно необхідне для утворення плазми, яка має позитивно впливати на якість пробою. Відкачка повітря та підтримання вакууму у середині камери також відбувається через вищезгадані отвори.

На креслені зазначені усі розміри для оцінки вільного простору. Вибір компонентів, що виконуватимуть фокусування променів лазерного світла необхідно проводити з урахуванням того, що вони мають бути якомога компактнішими, аби не займати обмежений простір, мають мати фокусну відстань, що дозволить не заглиблювати на значну відстань коліматори у тіло камери. Це і залишить вільний простір і буде захищати оптику від механічних пошкоджень, що можуть бути спричинені вибухами. Двигун, що рухатиме анод так само має мати незначні габарити для вдалого його розташування.

На рисунку 3.16 зображено момент, коли відбувається пробій діода, що було зафіксовано на швидкісну камеру. Внаслідок високовольного розряду можна спостерігати освітлення, що просвічує пластмасові діелектричні елементи конструкції.



Рисунок 3.16 – Фото експериментальної установки в момент пробою

3.5 Лазери

Лазер – це пристрій, який випромінює світло через процес оптичного посилення, заснований на стимульованій емісії електромагнітного випромінювання. Термін «лазер» виник як аббревіатура від «light amplification by stimulated emission of radiation», що перекладається, як «посилення світла за рахунок вимушеного випромінення».

Лазер відрізняється від інших джерел світла тим, що випромінює когерентне світло. Просторова когерентність дозволяє сфокусувати лазер на обмеженій площі, дозволяючи такі застосування цього приладу, як лазерне різання та літографія. Просторова когерентність також дозволяє лазерному променю залишатися вузьким на великій відстані (колімація), дозволяючи застосовувати такі прилади, як лазерні вказівники та лідар. Лазери також можуть мати високу часову когерентність, що дозволяє їм випромінювати світло з дуже вузьким спектром, тобто вони можуть випромінювати один колір світла. Як альтернативу, часову когерентність можна використовувати для отримання імпульсів світла з широким спектром, але тривалістю коротшою, ніж фемтосекунда (ультракороткі імпульси) [4].

Просторова когерентність зазвичай виражається через вихід, який є вузьким променем, який обмежений дифракцією. Лазерні промені можна сфокусувати на дуже крихітних точках, досягаючи дуже високої освітленості, або вони можуть мати дуже низьку дивергенцію, щоб сконцентрувати свою потужність на великій відстані. Часова (або поздовжня) когерентність передбачає поляризовану хвилю на одній частоті, фаза якої корелює на відносно великій відстані (довжині когерентності) вздовж променя.

Промінь, вироблений тепловим або іншим некогерентним джерелом світла, має миттєву амплітуду та фазу, які випадково змінюються щодо часу та положення, маючи, таким чином, коротку довжину когерентності [5].

Лазери характеризуються відповідно до довжини хвилі у вакуумі. Більшість лазерів з однією довжиною хвилі насправді виробляють випромінювання в декількох режимах з дещо різними довжинами хвиль. Хоча часова когерентність передбачає монохроматичність, існують лазери, які випромінюють широкий спектр світла або випромінюють різні довжини хвиль світла одночасно. Деякі лазери не мають просторового простору і мають світлові промені, які розходяться більше, ніж вимагає межа дифракції. Всі такі пристрої класифікуються як «лазери» на основі їх методу отримання світла,

тобто стимульованого випромінювання. Лазери використовуються там, де світло необхідної просторової або часової когерентності не може бути отримано за допомогою більш простих технологій.

З фізичної точки зору, лазер працює наступним чином. У класичному поданні енергія електрона, що обертається навколо атомного ядра, більша на орбітах, розташованих далі від ядра атома. Однак квантово-механічні ефекти змушують електрони приймати дискретні положення на орбіталах.

Електрон в атомі може поглинати енергію від світла (фотони) або тепла (фонони), лише якщо між рівнями енергії існує перехід, який відповідає енергії, яку несе фотон або фонон. Для світла це означає, що будь-який даний перехід поглине лише одну певну довжину хвилі світла. Фотони з правильною довжиною хвилі можуть змусити електрон стрибнути з нижчого на вищий енергетичний рівень. У цьому процесі фотон витрачається[6].

Коли електрон збуджується з одного стану в той, що знаходиться на більш високому рівні енергії з різницею енергій ΔE , він не залишиться таким назавжди. Зрештою, з вакууму, що має енергію ΔE , спонтанно створюється фотон. Зберігаючи енергію, електрон переходить на нижчий енергетичний рівень, який не зайнятий, при цьому переходи на різні рівні мають різні постійні часу. Цей процес називається «спонтанним викидом». Спонтанне випромінювання – це квантово-механічний ефект і прямий фізичний прояв принципу невизначеності Гейзенберга. Випромінюваний фотон має випадковий напрямок, але його довжина хвилі відповідає довжині хвилі поглинання переходу. Це механізм флуоресценції та теплового випромінювання.

Фотон з правильною довжиною хвилі, що поглинається переходом, також може спричинити падіння електрона з вищого на нижчий рівень, випромінюючи новий фотон. Випромінюваний фотон точно відповідає вихідному фотону за довжиною хвилі, фазою та напрямком. Цей процес називається стимульованим викидом.

Коефіцієнт посилення переходить у збуджений стан зовнішнім джерелом енергії. У більшості лазерів це середовище складається з сукупності атомів, які були збуджені в такий стан за допомогою зовнішнього джерела світла, або електричного поля, яке постачає енергію для атомів для поглинання та перетворення в їх збуджені стани.

Зазвичай коефіцієнт посилення лазера – це матеріал контрольованої чистоти, розміру, концентрації та форми, який підсилює промінь за допомогою описаного вище процесу стимульованого випромінювання. Цей матеріал може бути будь-якого стану: газовий, рідкий, твердий або плазмовий. Коефіцієнт посилення поглинає енергію накачки, що піднімає частину електронів у більш енергетичні (збуджені) квантові стани. Частинки можуть взаємодіяти зі світлом, поглинаючи або випромінюючи фотони. Викиди можуть бути спонтанними або стимульованими. В останньому випадку фотон випромінюється в тому ж напрямку, що і світло, що проходить повз. Коли кількість частинок в одному збудженому стані перевищує кількість частинок у якомусь енергетичному стані, досягається інверсія популяції. У цьому стані швидкість стимульованого випромінювання більша, ніж швидкість поглинання світла в середовищі, і тому світло посилюється. Система з цією властивістю називається оптичним підсилювачем. Коли оптичний підсилювач розміщений всередині резонансної оптичної порожнини, він отримує лазер [7].

У декількох ситуаціях можна отримати генерацію лише за один прохід ЕМ-випромінювання через середовище посилення, і це створює лазерний промінь без потреби в резонансній або відбивальній порожнині. Таким чином, для лазера зазвичай потрібне відбиття в резонансній порожнині, але це не є абсолютно необхідним.

Оптичний резонатор іноді називають "оптичною порожниною", але це помилково: лазери використовують відкриті резонатори на відміну від буквальної порожнини, яка застосовується на мікрохвильових частотах в мазері. Резонатор, як правило, складається з двох дзеркал, між якими

когерентний промінь світла рухається в обох напрямках, відбиваючись назад на себе, так що середній фотон буде проходити через середовище посилення багаторазово, перш ніж він буде випромінюватися з вихідної апертури або втрачатися внаслідок дифракції або поглинання. Якщо коефіцієнт підсилення (посилення) в середовищі більший, ніж втрати резонатора, тоді потужність рециркуляційного світла може зростати в геометричній прогресії. Але кожна подія стимульованого випромінювання повертає атом із збудженого стану в основний стан, зменшуючи коефіцієнт посилення середовища. Зі збільшенням потужності пучка чистий коефіцієнт підсилення (коефіцієнт підсилення мінус втрати) зменшується до одиниці, а середовище підсилення називається насиченим. У лазері безперервної хвилі (CW) баланс потужності насоса проти насичення посилення та втрат порожнини створює рівноважне значення потужності лазера всередині порожнини; ця рівновага визначає робочу точку лазера. Якщо застосовувана потужність насоса занадто мала, коефіцієнт посилення ніколи не буде достатнім для подолання втрат порожнини, і лазерне світло не буде вироблятися. Мінімальна потужність насоса, необхідна для початку дії лазера, називається порогом генерації. Коефіцієнт посилення посилить будь-які фотони, що проходять через нього, незалежно від напрямку; але лише фотони в просторовому режимі, підтримувані резонатором, пройдуть більше одного разу через середовище і отримають значне посилення [8].

У більшості лазерів генерація починається із спонтанного випромінювання в режим генерації. Потім це початкове світло посилюється за рахунок стимульованого випромінювання в середовищі посилення. Стимульоване випромінювання виробляє світло, яке відповідає вхідному сигналу за напрямком, довжиною хвилі та поляризацією, тоді як фаза випромінюваного світла становить 90 градусів у відведенні стимулюючого світла. Це в поєднанні з фільтруючим ефектом оптичного резонатора надає лазерному світлу характерну когерентність і може надати рівномірну поляризацію та монохроматичність залежно від конструкції резонатора. Основна ширина лінії лазера світла, що випромінюється від генераторного

резонатора, може бути на порядок вужчою, ніж ширина лінії світла, що випромінюється від пасивного резонатора. Деякі лазери використовують окрему інжекційну сівалку, щоб розпочати процес пучком, який і без того є дуже когерентним. Це може створити пучки з більш вузьким спектром, ніж це було б можливо.

3.5.1 Обґрунтування вибору параметрів лазерів

Лазерна плазма може існувати в широкому діапазоні параметрів, це наступні показники:

- при температурах – від 1 eV до 10^4 eV;
- при швидкостях руху – до 10^8 см/с;
- допустимий тиск – більше 10^{11} Па.

Час життя лазерної плазми визначається тривалістю лазерного імпульсу, що впливає і часом розльоту речовини. У всіх різновидах лазерної плазми початкова стадія її утворення пов'язана або з оптичним пробоем, іонізацією електронним ударом і подальшим утворенням лавини іонізації, або в результаті багатофотонної іонізації.

Як правило, перший механізм вносить більший внесок в процес іонізації. Внесок багатофотонної іонізації збільшується зі зростанням інтенсивності лазерного випромінювання і зі зменшенням щільності речовини. В лазерній плазмі спостерігалися іони з дуже високою кратністю іонізації (аж до 40-50).

При великих потужностях експериментально спостерігаються самофокусування лазерного променя (зменшення його діаметра при поширенні в неоднорідній плазмі) і філаментация (спонтанне виникнення і зростання дрібномасштабних неоднорідностей поля при спочатку однорідному хвильовому фронті). Причина цих ефектів – тиск

електромагнітного поля лазерного випромінювання або неоднорідний нагрів плазми, локально змінюють її щільність і коефіцієнт заломлення і, отже, впливають на поширення лазерного випромінювання.

Вплив потужної електромагнітної хвилі на лазерну плазму призводить до утворення плазмових хвиль (коливань електронної та іонної густини), які взаємодіють з первинною і розсіяною світловими хвилями. В результаті утворюються гармоніки падаючої світлової хвилі. Імовірність генерації високих гармонік збільшується зі збільшенням інтенсивності лазерного випромінювання. При інтенсивності 10^{20} - 10^{21} Вт / см² експериментально зареєстровані гармоніки до номера 3200. Енергія квантів випромінювання найбільш високих гармонік досягає 3800 еВ при енергії кванта лазерного випромінювання 1,18 еВ (для випромінювання лазера на неодімовому склі).

При високих інтенсивностях лазерного випромінювання, що перевищують 10^{14} – 10^{15} Вт / см², у розподілі електронів та іонів в лазерній плазмі присутні нерівноважні, надтеплові електрони і іони. Генерація швидких електронів пов'язана з резонансним зростанням електричного поля в області поглинання і прискоренням електронів цим полем. У свою чергу, електричне поле швидких електронів призводить до прискорення іонів. Число швидких електронів та іонів і їх енергія ростуть із зростанням інтенсивності і довжини хвилі лазерного випромінювання. В експериментах при інтенсивності 10^{20} – 10^{21} Вт / см² енергія швидких електронів та іонів досягає декількох сотень MeV.

Температура лазерної плазми зростає зі збільшенням інтенсивності лазерного випромінювання. Відносно легко досягається температура в кілька кеВ і плазма стає потужним джерелом жорсткого рентгенівського випромінювання. У це випромінювання може бути перетворено до 60% енергії лазерного імпульсу. Ефективність випускання зростає зі збільшенням атомного номера іонів плазми.

В лазерній плазмі експериментально виявлені надсильні магнітні поля (з магнітною індукцією до $10^2 - 10^3$ Тл). Генерація магнітних полів в плазмі пов'язана з виникненням замкнутих термоелектричної струмів, причиною появи яких є розбіжність напрямків зміни температури і щільності електронів плазми.

Поглинання енергії лазерного випромінювання залежить від довжини хвилі, матеріалу поверхні і її стану і кута падіння випромінювання.

В атмосферному повітрі біля поверхні металів плазма з'являється при інтенсивності близько 10^7 Вт /см². Пробій повітря у відсутності поверхні, здійснюваний в тих же умовах, відбувається при інтенсивності $10^9 - 10^{10}$ Вт /см² [5].

При впливі лазерів мілісекундної і більшої тривалості порогова величина зменшується, ще більше опускаючись до $10^5 - 10^6$ Вт /см².

Аналогічне зниження порога оптичного пробою газу лазерним випромінюванням спостерігалось при наявності в ньому зважених пилоподібних частинок аерозолі.

Для лазерів, призначених для технологічних цілей, використовуються інтенсивності лазерного випромінювання в діапазоні до 10^{11} Вт /см². У цьому діапазоні найбільш поширені CO₂ і Nd-лазери, а типові параметри лазерної плазми змінюються при зміні інтенсивності від порога до зазначеного граничного значення, змінюються таким чином: електронна щільність змінюється в інтервалі $10^{15} - 10^{21}$ см⁻³, а температура при цьому змінюється від діапазону еВ до діапазону в області кеВ [7].

Нижче наведені типові експериментальні результати по утворенню лазерної плазми. Результати фотозйомки показують, що яскравий факел емісії виникає дещо пізніше максимуму лазерного імпульсу. Його яскравість й протяжність зростають протягом декількох наносекунд, досягаючи максимуму приблизно через 120 нс після початку лазерного

імпульсу. Потім факел досить повільно згасає, продовжуючи існувати ще майже протягом мікросекунди.

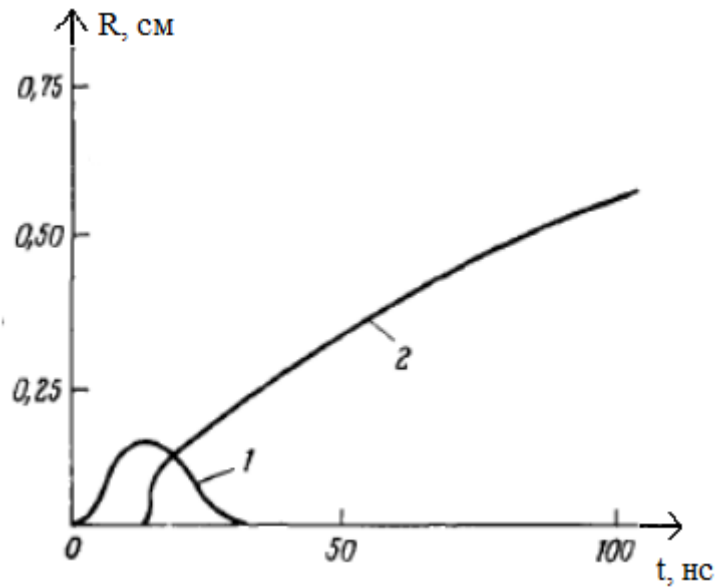


Рисунок 3.17 – Положення світлового краю розширювальної плазми, утвореної під дією імпульсу лазера на неодимовому склі потужністю 200 МВт, сфокусованого на мишені з графіту. 1 – лазерний імпульс, 2 – положення світлового краю.

При не дуже великих інтенсивностях випромінювання, що не надто перевищують поріг утворення плазми вимірювання просторової протяжності факела, що розвивається, показують, що його передній фронт рухається зі швидкістю приблизно $2 \cdot 10^6 \text{ см / с}$.

При високій інтенсивності випромінювання лазерів з модульованою добротністю вимірювані швидкості розширення відповідають високим енергіям часток.

Наприклад, при опроміненні алюмінієвої мішені імпульсом рубінового лазера з тривалістю близько 30 нс і енергією 2 Дж фотографічним методом було встановлено, що факел рухається від

мішені у напрямку до лазера зі швидкістю переднього краю близько 10^7 см / с, що відповідає енергії однократно іонізованого алюмінію 1400 еВ [5].

Ці величини швидкостей, визначені фотографічним методом, узгоджуються з даними про швидкості, отриманими з вимірювання часу прольоту до колектора зарядів.

Зміна положення границі, що світиться, плазми в часі, виміряний високошвидкісною камерою, для випромінювання неодимового лазера з вихідною потужністю 200 МВт при впливі на мішень з вуглецю, показує швидкість світлового краю викинутого матеріалу в кінці лазерного імпульсу становила $6,3 \cdot 10^6$ см / с, що відповідає енергії іонів 250 еВ. При поверхневій щільності енергії 700 Дж / см² швидкість фронту після викиду речовини з мішені швидко збільшується від $4,8 \cdot 10^6$ до $7 \cdot 10^6$ см / с.

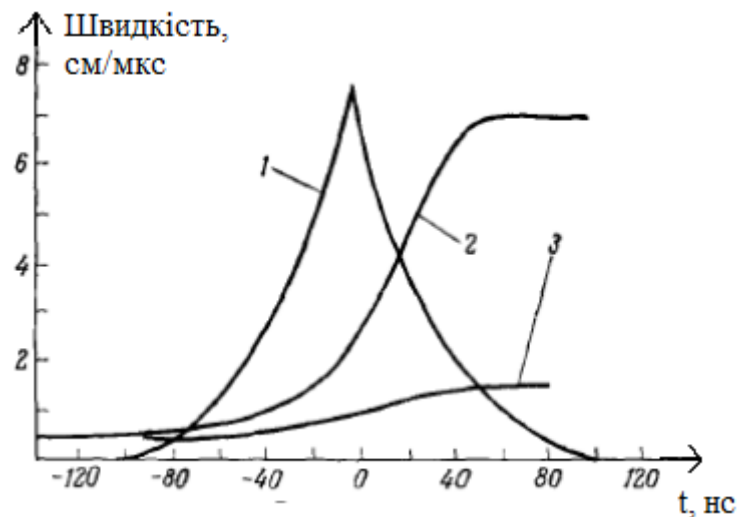


Рисунок 3.18 – Швидкість світлового фронту плазми як функція часу при дії сфокусованого променя, неодимового лазера з модульованою добротністю на мишені з графіту.

Час відраховується від моменту максимуму лазерного імпульсу:

1 – лазерний імпульс;

2 – швидкість фронту при щільності енергії 700 Дж/см²;

3 – швидкість фронту при 70 Дж/см².

В інших експериментах при фокусуванні на фольгу товщиною 2 мкм лазерного імпульсу неодимового лазера потужністю 60 МВт і тривалістю 20 нс утворилось приблизно 10^{16} електронів. Середня щільність електронів досягала величини 10^{19} см⁻³.

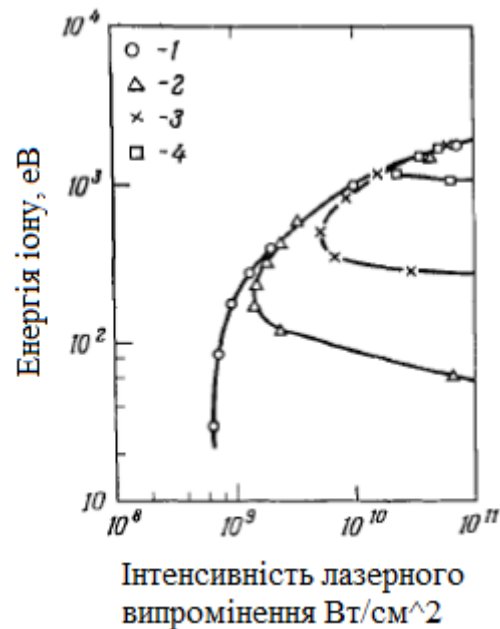


Рисунок 3.19 – Незалежність кінетичної енергії іонів від інтенсивності лазерного випромінювання. 1 — C⁺, 2 — C²⁺, 3 — C³⁺, 4 — C⁴⁺.

Максимальна кінетична енергія частинок приблизно постійна і не залежить від заряду іона.

Висновки:

- 1) Поріг інтенсивності лазерного випромінювання для отримання лазерної плазми є 10^7 Ватт /см².
- 2) Надійний результат по необхідному числу електронів в плазмі (близько 10^{16}) можна отримати при наносекундних протяжностях, енергії в імпульсі близько 1 Дж, і інтенсивності лазерного випромінювання в інтервалі від $5 \cdot 10^9$ Ватт /см² до 10^{10} Ватт /см² або вище.
- 3) При збільшенні інтенсивності лазерного випромінювання і наближенні її до 10^{10} Ватт /см² швидкість плазми виявляється поблизу 10^7 см / сек і може забезпечити за час імпульсу розширення плазми за кілька наносекунд на величину близько часток міліметра.
- 4) Для забезпечення розподілу джерел плазми уздовж кромки катода довжиною від 10 до 15 см необхідно використання близько 10 променів, сфокусованих на областях поверхні катода, розташованих один від одного на відстанях близько сантиметра.

Таким чином, параметри лазера повинні відповідати таким вимогам:

- 1) Орієнтуючись на тривалість фронту високовольтної напруги близько 10 наносекунд, передбачається використання лазерного випромінювання тривалістю близько 5-7 наносекунд.
- 2) Загальна енергія в імпульсі лазерного випромінювання повинна бути від 10 Дж, щоб енергія в кожному промені була від 1 Дж.
- 3) Потужність лазерного випромінювання кожного променя в імпульсі виявляється порядку $2 \cdot 10^8$ Ватт, а у фокусі з радіусом 1 мм, отримуємо інтенсивність лазерного випромінювання $6.4 \cdot 10^9$ Ватт /см².
- 4) Швидкість плазми при цьому близько 10^7 см / сек і відстань між плазовими утвореннями діаметром 2 мм за час імпульсу скорочується на величину від 0.5 до 1 мм.

3.5.2 Вибір лазерів

Розглянемо лазерне устаткування від провідного виробника імпульсних лазерів. Завдання розгляду – підібрати один чи кілька лазерів, які б змогли реалізувати вимоги, що сформульовані у попередньому розділі.

Лазери серії NL310 з високою імпульсною енергією орієнтовані на такі задачі, як ОРО або Ti: перекачування сапфіром, обробка матеріалів та діагностика плазми. Власне, утворення плазми і є задачею лазерів у даній системі. Ці лазери можуть виробляти енергію імпульсу до 10 Дж в основній довжині хвилі при повторенні імпульсу 10 Гц. Для зручності лазером з наносекундним перемиканням Q-серій NL310 можна керувати за допомогою віддаленої клавіатури або порту USB-CAN. Пульст дистанційного керування дозволяє легко контролювати всі параметри та оснащений дисплеєм з підсвічуванням, який легко читати навіть у захисних лазерних окулярах. Для управління лазером з ПК надається програмне забезпечення для операційної системи Windows™. Також постачаються драйвери LabView, що дозволяють інтегрувати лазерний контроль в існуючі програми LabView [9].

Необов'язкові другі (SH, 532 нм), треті (TH, 355 нм), четвертий (FH, 266 нм) і п'ятий (FiH, 213 нм) генератори гармонік можуть бути інтегровані в лазерну головку або розміщені за межами лазерної головки в допоміжний модуль генератору гармонік. Перемикання вихідної довжини хвилі здійснюється вручну. Моторизоване перемикання довжини хвилі доступне також, але як додаткова функція [9].

Запуск лазера можливий за допомогою вбудованого внутрішнього або зовнішнього генератора імпульсів. Для зовнішнього спрацьовування необхідні імпульси з рівнем TTL.

Особливості:

- Вихідна енергія до 10 Дж.

- Стабільність енергії, що вкладається в імпульс, можлива похибка – до 0,5%.
- Тривалість імпульсу 4–6 нс.
- Частота повторень 10 або 20 Гц.
- Стабілізовані за температурою генератори другої, третьої, четвертої та п'ятої гармонік.
- Пульти дистанційного керування через клавіатуру або порт USB-CAN.
- Внутрішня / зовнішня синхронізація з низьким тремтінням.

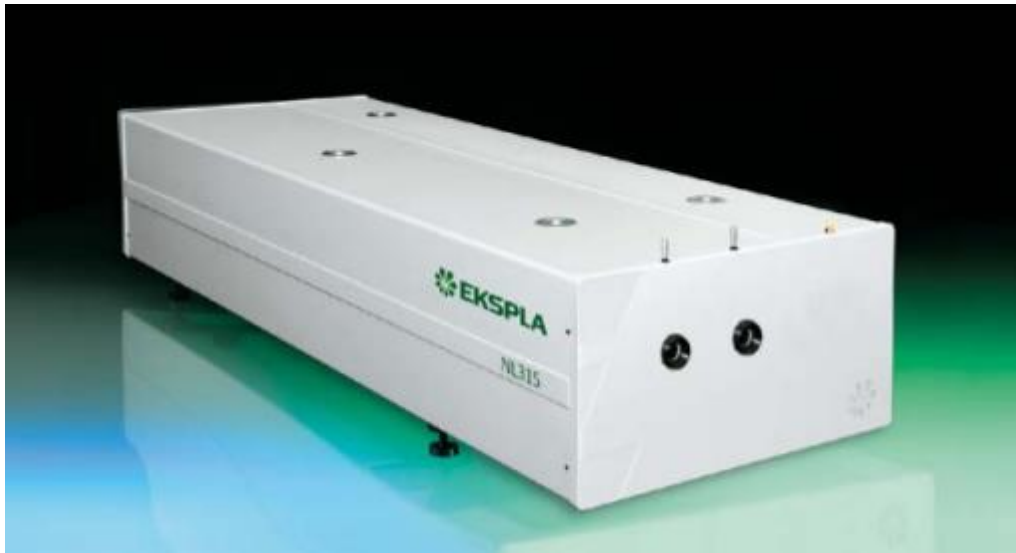


Рисунок 3.20 – Лазер серії NL310 [9]

Даний лазер задовольняє всі мінімальні вимоги, що були висунуті до такого пристрою у розділі 3.5.1. Також лазери EKSPLA є зручними у використанні та доволі компактними, навіть одними з найкомпактніших на ринку.

Вище згаданий лазер у кількості одного екземпляру здатний надати променями необхідну кількість енергії в імпульсі. Але, як зазначалось раніше, діод має бути опромінено шістьма – десятьма променями. Для того, щоб

отримати з одного променю десять необхідно використати дільники. Кожен з дільників, що будуть встановлено концентрично, має забирати 10% світлової енергії та направляти у свій (пов'язаний з ним коліматор).

4 КОНЦЕПЦІЯ СИСТЕМИ

Розроблювана система призначена для проведення експериментів на установці. Суть експериментів полягає у тому, що потрібно визначити яким чином конфігурації параметрів, які можна задавати або вимірювати, впливають на виділення енергії у навколишнє середовище при пробі діода.

Ансамбль з лазерних променів призначений для створення плазми, яка має зробити процес пробою більш контрольованим та забезпечить більшу крутизну переднього фронту імпульса потужності та заднього фронту імпульса потужності. Під «контрольований» мається на увазі – викликаний у потрібний час, достатньою кількістю плазми, що знаходитиметься в діоді, після спрацювання лазерів, та слугуватиме певним «мостом» для пробою. Завдяки утвореній плазмі пробій відбувається на долі секунд раніше, аніж він відбувся б при досягненні максимальної різниці потенціалів між катодом та анодом, пройшовши через вакуум, не «використовуючи» іонізовані часточки, що були утворені лазерним опроміненням. На рисунку 4.1 показано параметри з одного експерименту без використання лазера.

Точність спрацювання та синхронізації лазерів має вимірюватись наносекундами, оскільки з рисунку 4.1 видно, що мова йде про імпульси, які тривають до 50 наносекунд. Відповідно, і сам лазерний імпульс має бути не довшим, аніж 10 наносекунд, адже він має швидко вивільнити, розраховану в наступних розділах, кількість плазми з матеріалу катода чи анода, за такий час, до (або після), спрацювання розрядників, щоб при надходженні заряду до катода, – діод був насичений такою кількістю іонізованих атомів, що пришвидшили б та спрямували б пробій.

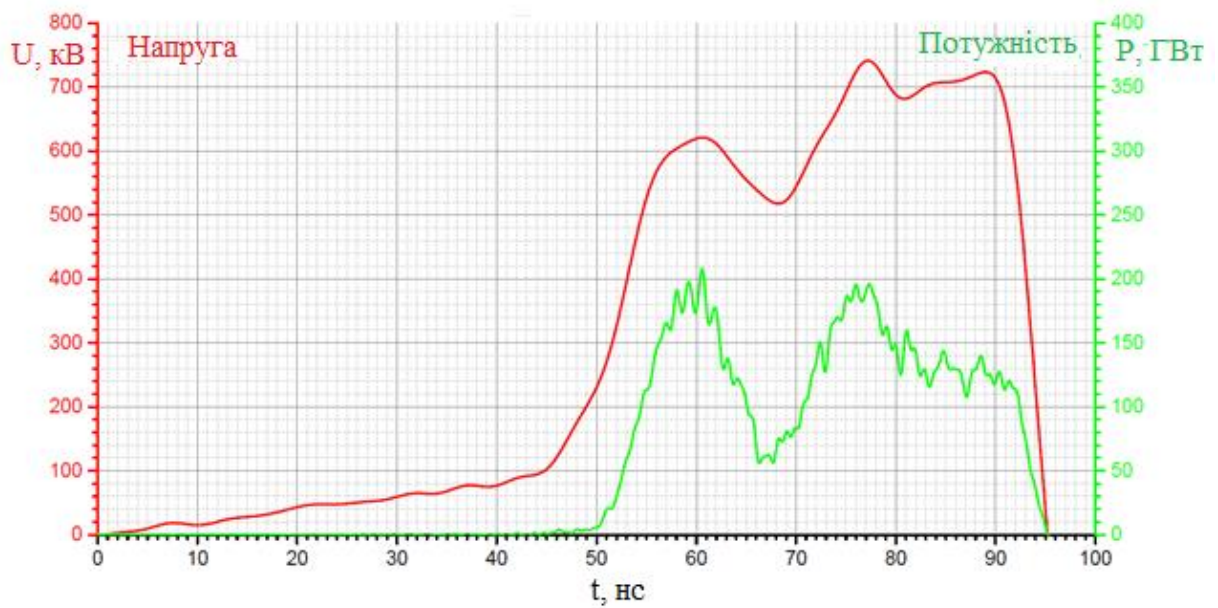


Рисунок 4.1 – Дані з осцилографа про експеримент без використання лазера.

Для визначення потужності у блок обчислювальних приладів надходять значення струму та напруги. З точки зору розроблюваної системи, напруга – той параметр, на який окремо впливати неможливо, оскільки вона залежить від конфігурації розрядників, які не будуть розглядатися у системі керування лазерами, а струм – залежить від багатьох параметрів в діоді, два з них – відстань між катодом і анодом та налаштування лазерів – будуть регулюватись розроблюваною системою.

Основним параметром для визначення оптимального режиму роботи лазерів та зазору між катодом і анодом – є температура до якої нагріваються екрани, оскільки саме цей зворотній зв'язок показує кількість виділеної енергії.

Коліматори лазерів розташовуються концентрично, навколо діода, аби забезпечити рівномірне опромінення катода або анода з усіх сторін. Це дозволяє виділеній плазмі знаходитись рівномірно навколо осі діода, що,

безсумнівно, відіграє на користь швидкості пробою та на користь фокусуванню.

Оскільки мова йде про експериментальну діяльність – буде тестуватись багато різних варіантів спрацьовування та направлення лазерів. Для цього коліматори мають бути рухомим. Вони повинні переміщуватись вздовж осі катод-анод, та повинні мати можливість змінювати кут нахилу променів відносно осі діода аби можна було тестувати як впливає на якість процесу пробою формування лазерами плазми на катоді або аноді, або і на катоді і на аноді одночасно. Блок керування лазерів повинен мати можливість вмикати випромінення в різні моменти відносно пробою в діоді, що регулюється або затримкою, відносно ініціювання периферією установки процесів, що ініціюють пробій в діоді, або досягненням усталеного значення різниці потенціалів між катодом та анодом. Для зміни зазору діода зроблено діод рухомим, завдяки електродвигуну. Катод зробити рухомим не можливо через особливості конструкції установки, до нього підводиться значна кількість з'єднань, що передають заряд від генератора імпульсів (драйвера).

5 ОПИС СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

Структурна схема зображена у додатку Б.

Структурна схема містить в собі деталі, що зроблять можливим функціонування та, власне, втілення ідей, що були описані в минулому розділі. Тому до структурної схеми можна сформулювати наступне технічне завдання.

Першочергово, необхідно забезпечити вимір температур на екранах, або на інших фізичних тілах, що виконуватимуть функцію поглинання виділеної енергії. Для розрахунків необхідна, власне, різниця між початковою та кінцевою температурою. На перспективу варто передбачити конструктивні та апаратні рішення для зміни напрямку випромінення лазерного світла, що дозволить підсвічувати різні частини діода та зробить функцію лазерного підсвічення активною при, майже, будь-яких конструктивних змінах експериментальної камери. Це означає, що коліматори та світловоди мають бути рухомим. Такий рух має бути спостережуваний, вкрай точний, має здійснюватися, як при ручному, так і при автоматичному керуванні. Однією з найважливіших функцій розроблюваної системи є доволі проста задача – переміщення анода вздовж осі діода. Таке переміщення має бути спостережуване, має передбачати можливість автоматичного та ручного керування. Допустима похибка при зміщенні – 1 відсоток. Центральний обчислювальний пристрій має мати можливість обробляти широкий спектр інформації – таку, що згадується у даній дисертації, та будь-якоку іншу, необхідність у якій може виникнути у перспективі. Також за ЦОП залишаються функції керування вищезгаданими апаратами та математичної обробки отримуваних даних. Звичайно, розроблювана система потребує зв'язку зі зовнішнім світом, тому має бути обладнана пристроями зв'язку та вводу/виводу даних.

Давачі температури. Дані датчики розташовані на екранах, що призначені для нагрівання від випромінення. За допомогою цих датчиків

є можливим та зручним збір зворотного зв'язку від зміни режиму роботи лазерів та зміни параметрів діода. Ця інформація є найбільш важлива з усіх вимірів, оскільки вона на пряму свідчить про ефективність основного процесу, а саме – скільки було виділено теплової енергії. Температурні данні збираються блоком обчислювальних пристроїв для оптимізації налаштувань. Функція підрахунку різниці температур початкової та кінцевою покладена на обчислювальний пристрій.

Давачі кутів нахилу коліматорів лазерів. Ці датчики потрібні для точного розуміння у яку точку напрямлене випромінення з кожного коліматора. Що дозволяє зі значною точністю підсвічувати будь-яку точку в діоді для проведення пошуку оптимального сценарію.

Давачі зміщення коліматорів лазерів призначені для відслідковування точного положення фіксатора коліматорів, який, за допомогою електродвигуна матиме можливість переміщуватись вздовж осі діода.

Вище згадані давачі положення коліматорів роблять можливим рух коліматорів вздовж осі діода, а отже, – і вздовж катода та анода, таким чином можна забезпечити концентричне підсвічення на будь-якому рівні вищезгаданих елементів та направити промінь під будь-яким кутом до осі. Це дозволить спостерігати, як зародження плазми в певному місці впливає на ефективність процесу.

Давач положення анода. Даний датчик відповідає за надання інформації по суті про те, на якому віддалені від кінця катода знаходиться кінець анода. Змінюватись вищезгадане віддалення може за допомогою електродвигуна, що рухатиме фіксатор анода. За допомогою підсистеми, що забезпечує зміну проміжку в діоді можна буде зібрати данні про вплив відстані між катодом і анодом на енергетичний вихід експерименту.

Амперметр та вольтметр обов'язково використовуються за призначенням для виміру напруги та струму у діоді. Ці данні слугують

основою для підрахунку потужності, яка є важливим параметром для спостереження.

Лазери. У розроблюваній системі, для створення плазми, будуть використовуватись лазери. Доречно використати або один потужний, або кілька менш потужних лазерів, промінь з яких буде поділено дільниками та розведено оптичними засобами по коліматорам. Лазери використовуватимуться імпульсні, оскільки опромінення має тривати до сотні наносекунд, а вкладена енергія має складати десятки джоулів. Таким чином по колу будуть надходити промені з 6-8 коліматорів, кожен з променів, маючи достатню потужність – створює плазму з поверхні матеріалу, на який він світить. Утворена таким чином плазма має стимулювати пробій діода у потрібний час та при оптимальних умовах, припускається, що згенерована плазма покращить форму імпульса пробією. Як зазначалось раніше, – бажано досягти якнайбільшої крутизни переднього та заднього фронту.

Двигун для переміщення аноду виконує функцію збільшення або зменшення відстані між катодом та анодом. Даний двигун працює у поєднанні з давачем зміщення аноду. Ця підсистема надає інформацію про зазор в діоді для проведення аналітики та внесення змін у величину зазору з метою пошуку оптимальної конфігурації.

Двигуни для нахилу коліматорів лазерів призначені для того, аби була можливість, при зафіксованій коретці з коліматорами, частину променів направити на один рівень по осі, а іншу частину – на інший рівень, також це надасть змогу направляти промені під кутом до поверхні та на торцеві поверхні.

Двигуни для зміщення коліматорів лазера. Дані двигуни роблять можливим пересування фіксатора коліматорів вздовж осі діода. Що дозволяє підсвічувати анод або катод в процесі пошуку оптимального вирішення.

У центральному обчислювальному пристрої системи передбачено USB-роз'єм. За допомогою якого є можливим процес збиру накопичених даних, статистики, також наявність такого апарату передачі даних дозволяє швидко вносити зміни в алгоритми програми обчислення та збору даних. Також вся ця інформація зберігається завдяки пристрою збереження даних.

Для зручності систему обладнано бездротовим модулем зв'язку для надання можливості спостерігати з різних девайсів в режимі онлайн за всіма даними та режимами роботи. Також такий модуль використовується для керування системою, різних налаштувань.

Перед центральним обчислювальним пристроєм стоїть задача керувати механізмами та роботою системи таким чином, аби накопичити статистику, яка покаже ту конфігурацію налаштувань, що є найбільш ефективною. Головним критерієм ефективності є температура, яку датчики температури зможуть зафіксувати на екранах. Даний пристрій має у ручному або автоматичному режимі змінювати параметри освітлення елементів діода, змінювати відстань між катодом і анодом, потім він має вчасно забезпечити лазерне опромінення, підлаштувавшись під процес ініціювання пробою в діоді та зберегти та опрацювати отримані температурні дані та дані про параметри та форму імпульсу потужності.

6 ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ

На експерементальній установці, для якої розробляється система, що власне і описується у даній роботі, було проведено ряд експеремнтів, які покликані внести ясність яким чином проміжок між катодом та діодом впливає на хід спровокованої реакції. Проміжок має значення, оскільки від нього залежить розмір точки фокусування енергії, що прямує з катода на анод, та багато інших параметрів, які мають вплив на результат екперименту.

З усіх отриманих даних експериментів найважливішими, та єдиними актуальними для даної роботи є залежність виділеної енергії від проміжку в діоді.

Екраном, що має виміряти виділену теплову нергію, для вищеописаних дослідів було обрано сталеву пластину. Вона піддаватиметься нагріву. З отриманих значень можна буде судити про те, при якому проміжку нагрів значніший. Вирахувати енергію, що поглинула пластина можна за просою формулою:

$$E = c * m * \Delta t \quad (6.1)$$

де:

E – теплова енергія;

c – теплоємність матеріалу пластини;

m – маса пластини;

Δt – зміна температури пластини.

У навадений Таблиці 7.1 показано чотири стовпці, що містять:

- значення номеру експеременту «N»;
- кількість поглиненої пластиною теплової енергії «E» (Дж);
- значення зміни температури пластини « Δt »;

- розмір проміжку в діоді «l» (мм).

Значення «Е» вираховується за вищезгаданою формулою, враховуючи те, що теплоємність матеріалу пластини – $500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, а її маса дорівнює 0,5 кг.

Таблиця 6.1 – Експериментальні дані

N	E, Дж	t, $^\circ\text{C}$	l, мм
1	417,5	1,67	1
2	450	1,80	1
3	307,5	1,23	1
4	327,5	1,31	1
5	475	1,90	1
6	697,5	2,79	2
7	727,5	2,91	2
8	700	2,80	2
9	922,5	3,69	2
10	827,5	3,31	2
11	1585	6,34	3
12	1695	6,78	3
13	1530	6,12	3
14	1580	6,32	3
15	1517,5	6,07	3
16	2075	8,30	4
17	1902,5	7,61	4
18	2000	8,00	4
19	1807,5	7,23	4
20	2050	8,20	4
21	2600	10,40	5

22	2750	11,00	5
23	2875	11,50	5
24	2477,5	9,91	5
25	2642,5	10,57	5
26	2445	9,78	6
27	2502,5	10,01	6
28	2625	10,50	6
29	2602,5	10,41	6
30	2375	9,50	6
31	2500	10,00	7
32	2250	9,00	7
33	2107,5	8,43	7
34	2245	8,98	7
35	2307,5	9,23	7
36	1865	7,46	8
37	1750	7,00	8
38	2277,5	9,11	8
39	1702,5	6,81	8
40	1695	6,78	8
41	1505	6,02	9
42	1480	5,92	9
43	1527,5	6,11	9
44	1445	5,78	9
45	1470	5,88	9
46	1477,5	5,91	10
47	1370	5,48	10
48	1467,5	5,87	10
49	1330	5,32	10
50	1362,5	5,45	10

Використати в експериментах роботу лазера було не можливо, оскільки розроблена в даній роботі система має стати основою для впровадження лазерної техніки у робочі установки. Тому для аналізу реальних даних у роботі буде розглядатись залежність енергії від проміжку (зазору).

Для аналізу цієї інформації та побудови математичної моделі було обрано програмний продукт MATLAB та один з його пакетів – System Identification Toolbox.

System Identification Toolbox – є одним з додатків MATLAB, що призначений для побудови математичних моделей динамічних систем. Для побудови моделей досліджуваних процесів необхідно задати масиви вхідних та вихідних даних, отриманих з експерименту. Вищезгаданий застосунок розглядає систему, як чорну скриньку, та будує модель спираючись тільки на інформацію про вхід та вихід об'єкта. Це робить даний інструмент зручним та корисним для створення математичних моделей динамічних систем [10].

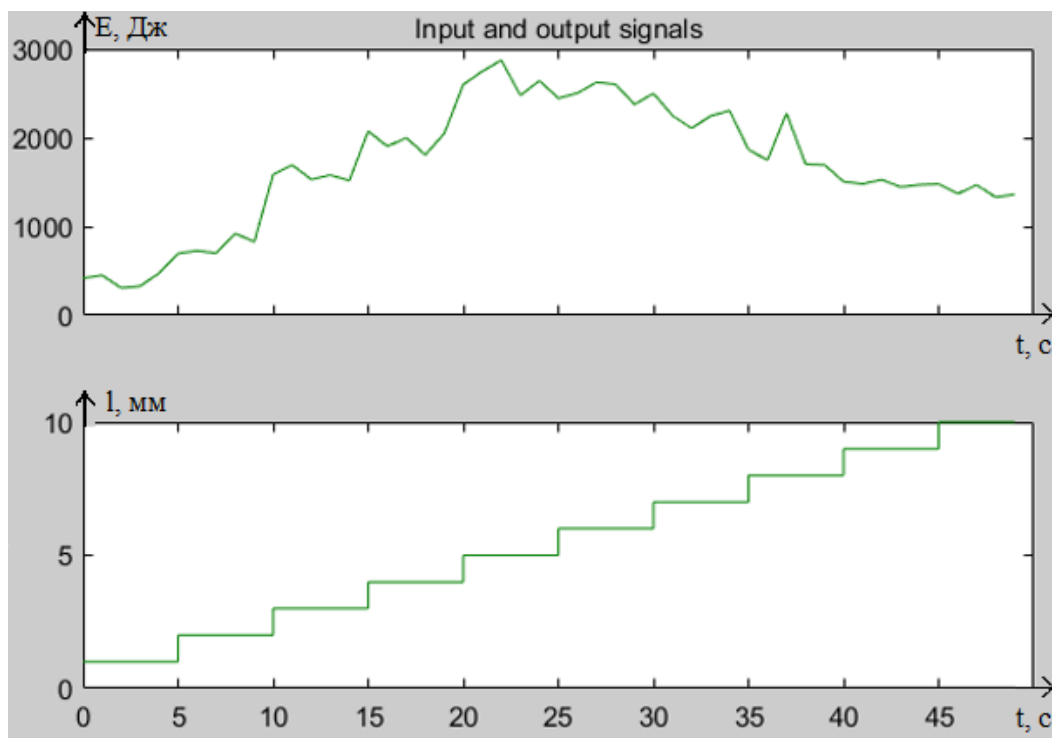


Рисунок 6.1 – Графіки значень енергії та проміжку, що подаються на вхід System Identification Toolbox

На рисунку 6.1 зображено зверху графік, що побудовано на основі значень енергії, що була передана екрану, дані значення взяті з таблиці 6.1 (стовпчик «Е»), на нижньому графіку зображені значення проміжку між анодом та катодом, що були записані у систему з таблиці 6.1 (стовбець «I»).

Наступним кроком, за допомогою різних інструментів, що запропоновані у System Identification Toolbox буде виконуватись складання математичної моделі, яка описуватиме зв'язок зазору та енергії.

Побудова моделі починається з формування вхідних впливів які подаються на об'єкт і вимірювання реакцій (відгуків) на вхідні дії. Потім вхідні і вихідні сигнали і обрана зі списку пакета структура використовуються для оцінки значень параметрів моделі відповідно до прийнятого критерієм якості. критерій якості ідентифікації характеризує ступінь адекватності моделі об'єкту в рамках узгоджених припущень і обмежень. Дуже часто використовується середньоквадратичний критерій - відхилення відгуку моделі від відгуку прототипу при одному і тому ж вхідній дії. Визначення достовірності моделі на етапі верифікації також визначається порівнянням відгуків для незалежних впливів які не використовувалися при ідентифікації.

6.1 Модель у вигляді передавальних функцій

Розглянемо метод Transfer Functions. У техніці передавальна функція електронного компонента або компонента системи управління – це математична функція, яка перетворює вихідні дані пристрою для кожного можливого входу. У найпростішій формі ця функція являє собою двовимірний графік незалежного скалярного входу проти залежного скалярного виходу, який називається кривою переносу або характеристичною кривою. Функції передачі для компонентів використовуються для проектування та аналізу

систем, зібраних з компонентів, особливо за допомогою техніки блок-схеми, в електроніці та теорії управління [11].

Розміри та одиниці передавальної функції моделюють вихідну поведінку пристрою для ряду можливих входів. Наприклад, передавальна функція такої двопортової електронної схеми, як підсилювач, може бути двовимірним графіком скалярної напруги, вихід якої є функцією скалярної напруги, що подається на вхід; передавальною функцією електромеханічного приводу може бути механічне переміщення рухомого важеля як функція електричного струму, що подається на пристрій; передавальною функцією фотодетектора може бути вихідна напруга як функція інтенсивності падаючого світла заданої довжини хвилі.

Термін «передавальна функція» також використовується в аналізі частотної області систем, що використовують такі методи перетворення, як перетворення Лапласа; тут це означає амплітуду вихідного сигналу як функцію частоти вхідного сигналу. Наприклад, передавальною функцією електронного фільтра є амплітуда напруги на виході як функція частоти постійної амплітуди синусоїди, що подається на вхід. Для оптичних зображувальних пристроїв функцією оптичного передавання є перетворення Фур'є функції розподілу точок [12].

Моделі у вигляді передавальних функцій описують взаємозв'язок між входами та виходами системи, використовуючи відношення поліномів. Порядок моделі дорівнює порядку знаменника. Корені многочлена знаменника називаються полюсами моделі. Корені багаточлена чисельника називаються нулями моделі.

Параметри моделі передавальної функції – це її полюси, нулі та транспортні затримки.

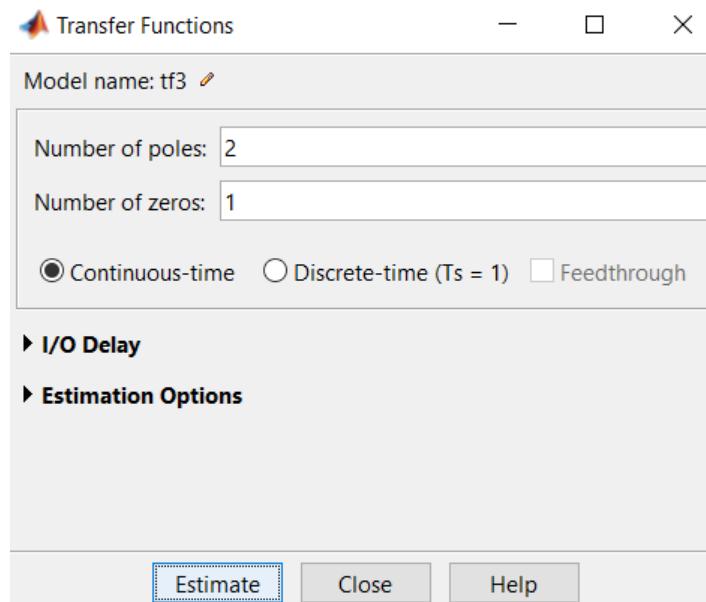


Рисунок 6.2 – Вибір параметрів для Transfer Function Model

Передбачено можливість налаштування правил за якими будуватиметься модель, у даному випадку – обирається кількість полюсів та нулів, та обирається тип представлення даних – безперервний або дискретний. Результат вибору параметрів зображено на рисунку 6.3.

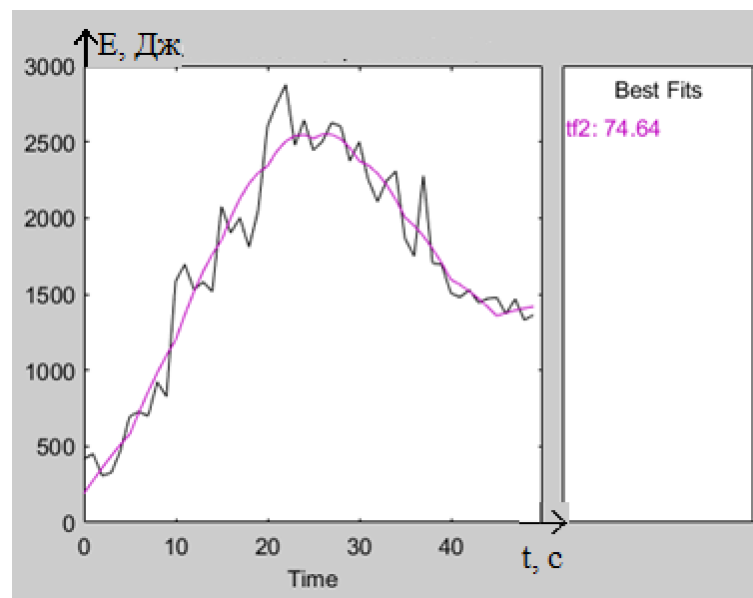
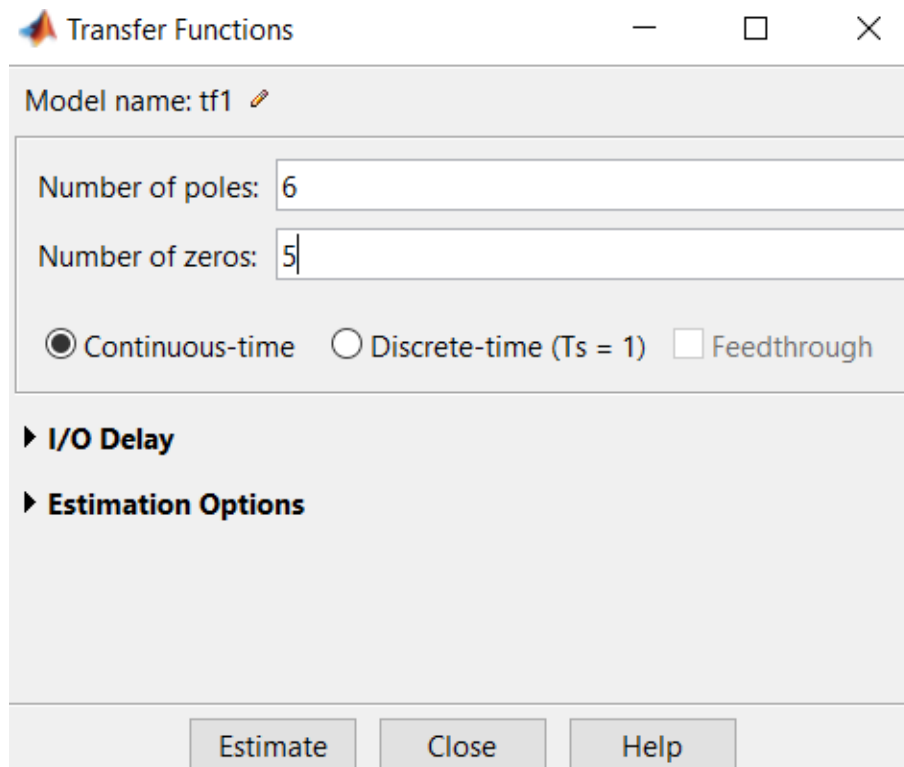


Рисунок 6.3 – Математична модель системи, побудована за допомогою інструмента Transfer Function Models

На рисунку 6.3 відображено ліловим кольором графік значень енергії, що видає новостворена математична модель, що була побудована Transfer Function Models. Відповідність її реальній системі – сягає 74,64%.

Виконаємо порівняння щойноствореної моделі з іншою, що буде побудована при інших параметрах.



Transfer Functions

Model name: tf1

Number of poles: 6

Number of zeros: 5

☒ Continuous-time ☐ Discrete-time ($T_s = 1$) ☐ Feedthrough

► I/O Delay

► Estimation Options

Estimate Close Help

Рисунок 6.4 – Вибір параметрів для Transfer Function Model (покращені параметри)

Як видно з рисунку 6.4, налаштування було змінено на більш точні, кількість полюсів та нулів – збільшилась.

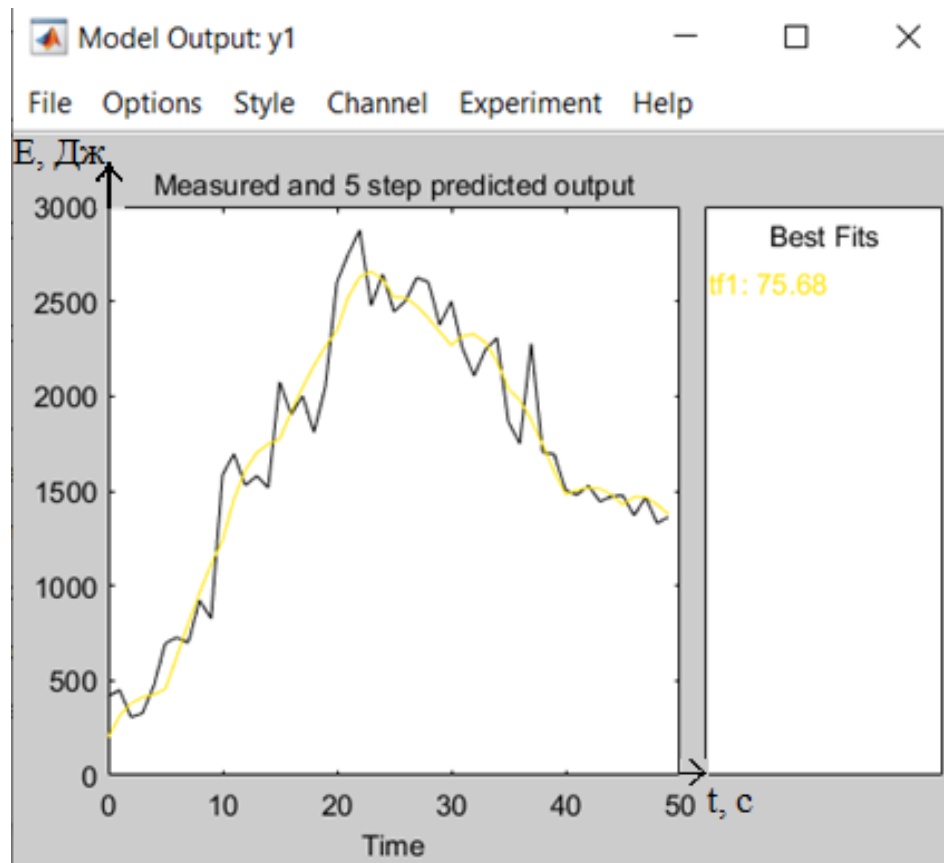


Рисунок 6.5 – Математична модель системи, побудована за допомогою інструмента Transfer Function Models (покращені параметри)

На рисунку 6.5 відображено жовтим кольором графік значень енергії, що видає новостворена математична модель, що була побудована Transfer Function Models. Відповідність її реальній системі – сягає 75,68%. Це означає, що точність та відповідність реальній системі покращились у порівнянні з попередньою моделлю. Перехідна функція, що описує цю математичну модель має такий вигляд :

$$\frac{131.6s^5 - 5.269s^4 + 44.2s^3 + 4.058s^2 + 4.54s + 0.08663}{s^6 + 0.1285s^5 + 0.4898s^4 + 0.04174s^3 + 0.05801s^2 + 0.001037s + 0.0008049} \cdot \quad (6.2)$$

Кількість полюсів: 6. Кількість нулів: 5.

Кількість вільних коефіцієнтів: 12.

Відповідність даним оцінки: 75,68% (забезпечується стабільність).

6.2 Модель простору станів

Наступним кроком – проведемо дослідження за допомогою методу State Space Models. Представлення простору станів – це математична модель фізичної системи як сукупності вхідних, вихідних та змінних стану, пов’язаних диференціальними рівняннями першого порядку або різницевиими рівняннями. Змінні стану – це змінні, значення яких еволюціонують з часом таким чином, що залежать від значень, які вони мають у будь-який момент часу, і від накладених зовні значень вхідних змінних. Значення вихідних змінних залежать від значень змінних стану [13].

«Простір станів» – це евклідов простір, в якому змінні на осях є змінними стану. Стан системи може бути представлений як вектор стану у цьому просторі. Щоб абстрагуватися від кількості входів, виходів і станів, ці змінні виражаються як вектори.

Якщо динамічна система є лінійною, інваріантною до часу та скінченновимірною, тоді диференціальні та алгебраїчні рівняння можуть бути записані у матричній формі. Метод простору станів характеризується суттєвою алгебраїзацією загальної теорії системи, що дає можливість використовувати вектор-матричні структури Кронекера. Представлення простору станів забезпечує зручний і компактний спосіб моделювання та аналізу систем із безліччю входів і виходів.

Моделі простору станів використовують змінні стану для опису системи за допомогою набору диференціальних або різницевих рівнянь першого порядку, а не за допомогою одного або декількох диференціальних або

різницевих рівнянь n -го порядку. Змінні стану $x(t)$ можуть бути реконструйовані за вимірними вхідно-вихідними даними, але самі не вимірюються під час експерименту. Структура моделі простору станів є гарним вибором для швидкого оцінювання, оскільки вона вимагає лише одного введення користувачем, порядку моделі, n [14].

Порядок моделі являє собою ціле число, що дорівнює розмірності $x(t)$, і стосується, але не обов'язково дорівнює кількості входів і виходів, що використовуються у відповідному рівнянні.

Часто легше визначити параметризовану модель простору станів у безперервному часі, оскільки фізичні закони найчастіше описуються через диференціальні рівняння. У цьому випадку отримані матриці містять елементи, що мають фізичну значимість – наприклад, матеріальні константи. x_0 визначає початкові стани. Можна оцінити модель простору станів безперервного часу, використовуючи як час, так і час дані частотного домену.

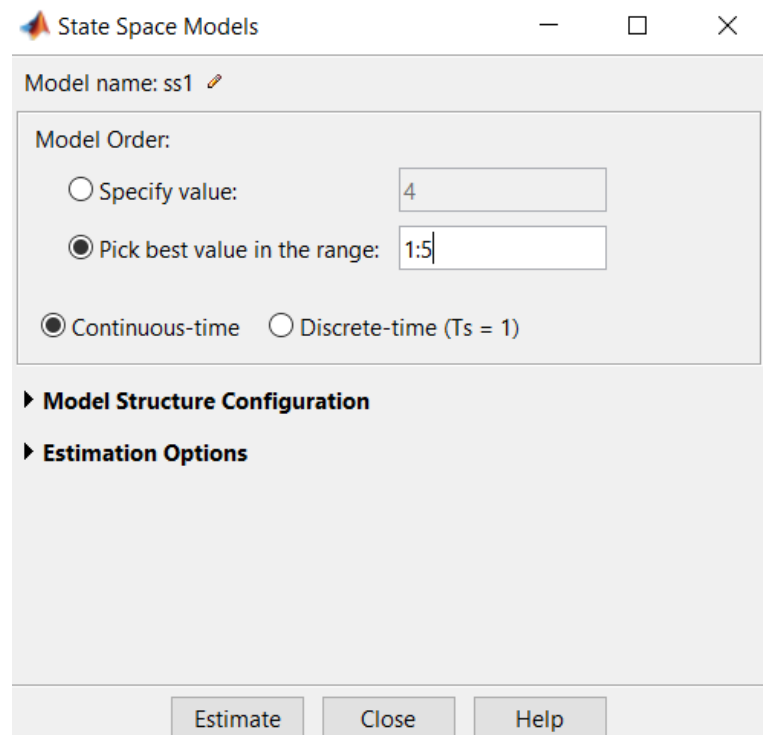


Рисунок 6.6 – Підбір параметрів математичної моделі, побудованої за допомоги State Space Models

System Identification Toolbox дозволяє підібрати порядок системи у напіваавтоматичному режимі. Для цього необхідно вказати проміжок допустимих значень порядку системи та почати дослідження. Результат зображено на рисунку 6.7.

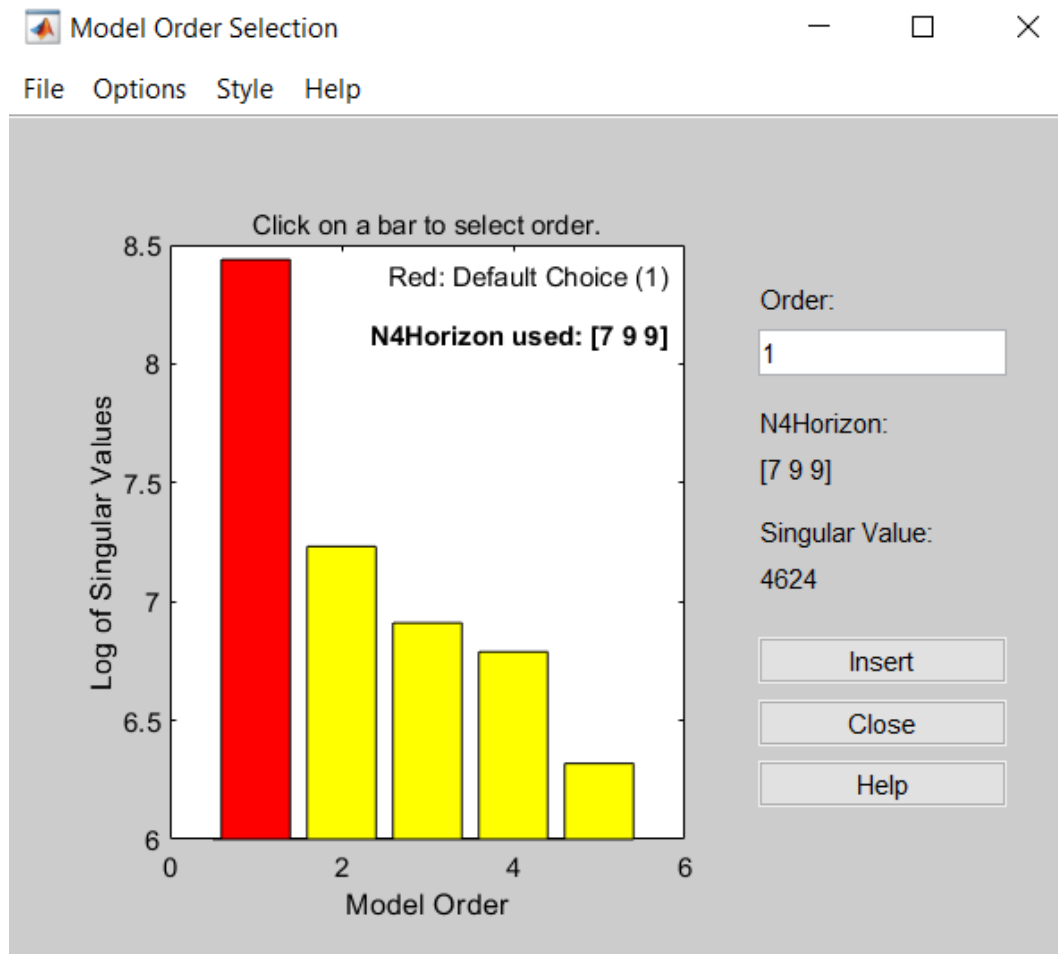


Рисунок 6.7 – Визначення порядку моделі

Горизонтальна вісь відповідає порядку моделі n . Вертикальна вісь, що носить назву «Журнал сингулярних значень», показує особливі значення матриці коваріації, побудованої на основі спостережуваних даних.

Слід використовувати цей графік для вирішення, які стани вносять суттєвий відносний внесок у поведінку моделі, а які – найменший внесок.

Обираємо таке значення n , що є граничним станом з такої логіки, що бажано обрати найменше значення порядку, але тоді, коли справа від нього залишаться такі значення, що не впливають суттєво на систему. Рекомендований вибір, що згенеровано автоматично, позначено червоним кольором. Але для більшої точності було обрано значення $n = 4$, адже тільки після нього діаграма спадає значною мірою. Після вибору будується математична модель.

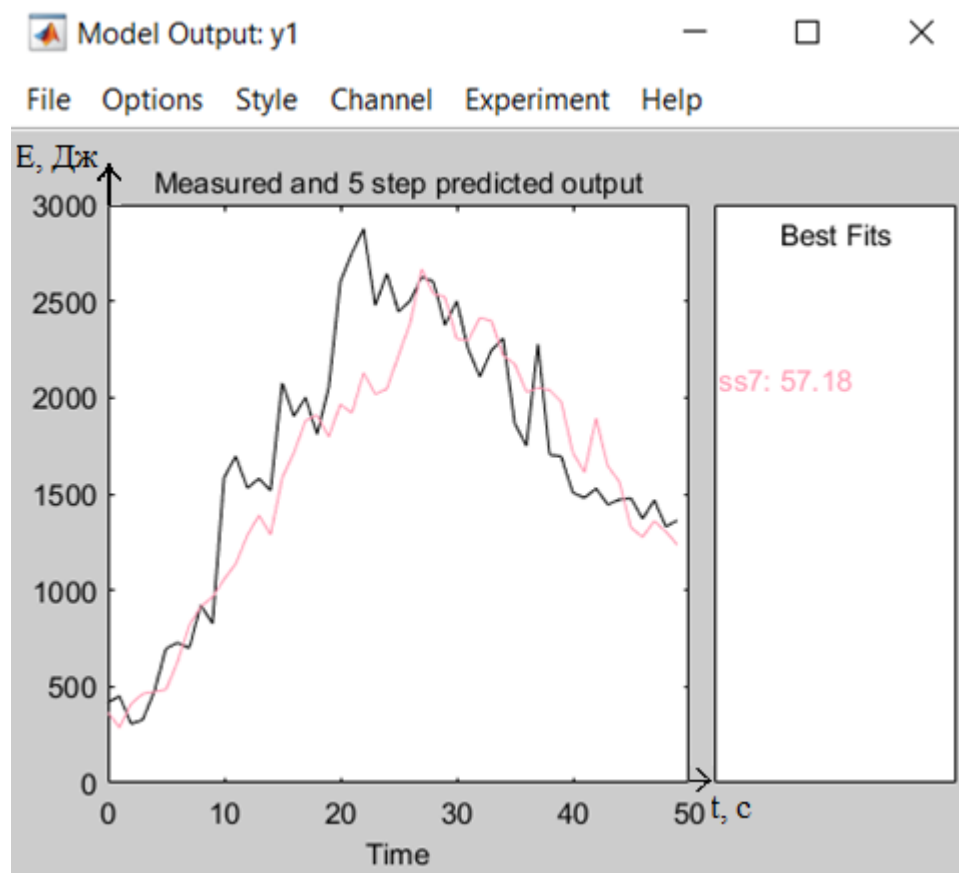


Рисунок 6.8 – Математична модель системи, побудована за допомогою інструмента State Space Models

Як видно з рисунку 6.8 – рожевим кольором відображено графік значень енергії, що видає математична модель, що була побудована інструментом State

Space Models. Відповідність її реальній системі – сягає 57,18%. Матриці, що описують цю математичну модель мають такий вигляд :

A =

	x1	x2	x3
x1	-0.2428	-0.8801	-0.09334
x2	-0.1667	-3.72	-2.152
x3	0.1563	0.8039	0.0798

B =

	u1
x1	0.01059
x2	-0.9534
x3	-0.01863

C =

	x1	x2	x3
y1	2418	1068	302.3

D =

	u1
y1	0

K =

y1

x1 0.000358

x2 0.0008227

x3 2.292e-05

$$dx/dt = A x(t) + B u(t) + K e(t)$$

$$y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)$$

Відповідність даним оцінки: 66,78% (фокус – прогнозування), що означає, що модель розроблялась з акцентом під розрахунок значень енергії при тих значеннях проміжку в діоді, що не тестувались.

6.3 Процесна модель

Інший базовий метод для складання математичної моделі – Process Models. Моделі процесів популярні для опису динаміки системи у багатьох галузях промисловості і застосовуються до різних виробничих середовищ. Переваги лінійної ідентифікації моделі в тому, що вони прості, підтримують оцінку транспортної затримки, а коефіцієнти моделі легко інтерпретуються як полюси та нулі [11].

Можна створювати різні структури моделей, змінюючи кількість полюсів, додаючи інтегратор або додаючи або видаляючи затримку часу або нуль. Можна вказати модель першого, другого або третього порядку, і полюси можуть бути реальними або складними (режими затухання).

Структура моделі процесу – це функція передачі безперервного часу, яка описує лінійну динаміку системи з точки зору одного або декількох з наступних елементів:

- статичний коефіцієнт підсилення K_p ;
- одна або кілька констант часу T_{rk} . Для складних полюсів постійну часу називають T_ω – рівною оберненій до власної частоти – а коефіцієнт затухання ζ (дзета);
- обробляється нуль T_z .

The screenshot shows the 'Process Models' window with the following configuration:

Transfer Function:
$$\frac{K \exp(-T_d s)}{(1 + T_{p1} s)(1 + T_{p2} s)}$$

Poles: 2 (dropdown), All real (dropdown)

Options: ☐ Zero, ☒ Delay, ☐ Integrator

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	-606238.92E	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	10000	Auto	[0 10000]
Tp2	<input type="checkbox"/>		Auto	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	30	Auto	[0 30]

Initial Guess: ☐ Auto-selected, ☐ From existing model: [], ☒ User-defined (Value-->Initial Guess)

Disturbance Model: None (dropdown), **Initial condition:** Auto (dropdown), **Regularization...** (button)

Focus: Simulation (dropdown), **Covariance:** Estimate (dropdown), **Options...** (button)

☐ Display progress, **Stop Iterations** (button)

Name: P2D, **Estimate** (button), **Close** (button), **Help** (button)

Рисунок 6.9 – Вибір параметрів математичної моделі, побудованої за допомогою Process Models

На рисунку 6.9 зображено налаштування у System Identification Toobox при яких відбуватиметься побудова математичної моделі системи алгоритмами Process Models.

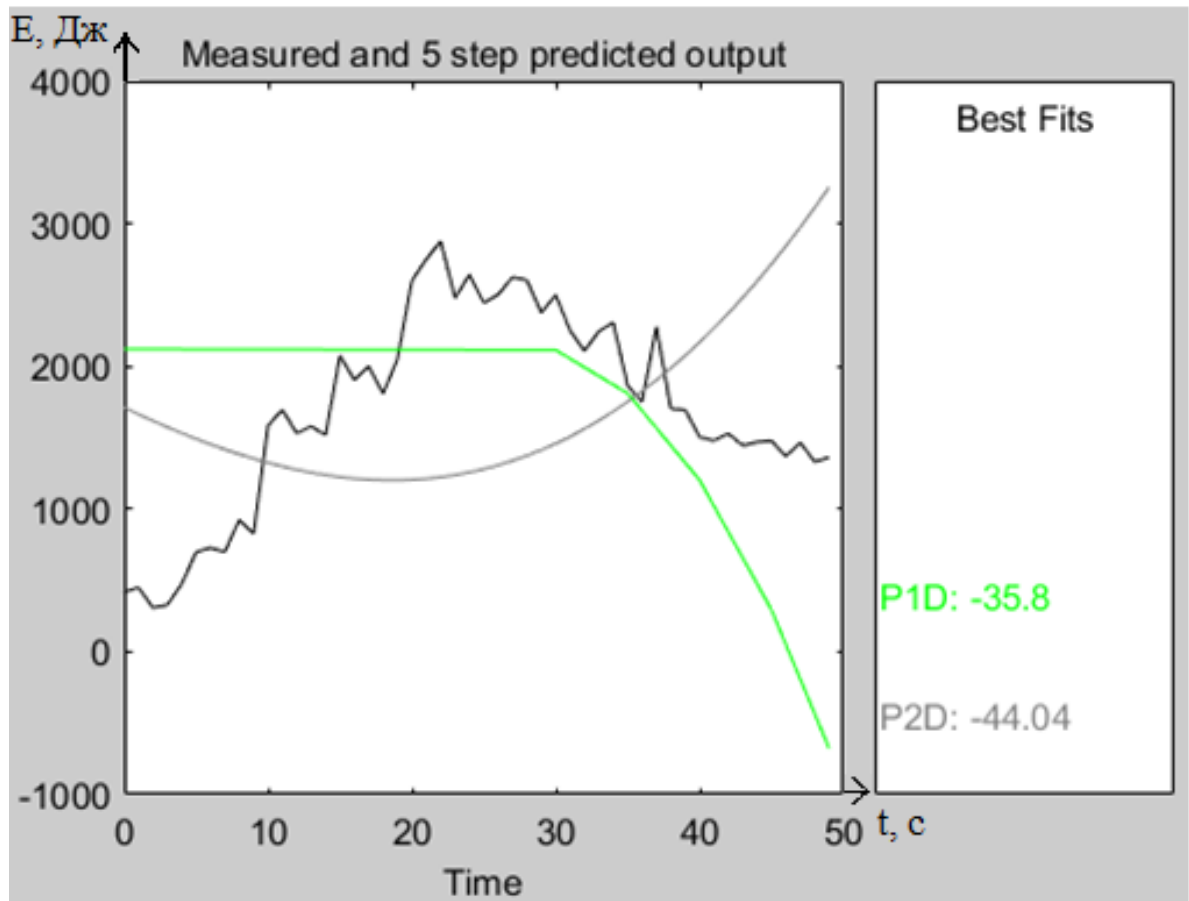


Рисунок 6.10 – Графіки математичних моделей Process Models

Було протестовано різні налаштування для побудови математичної моделі методами Process Models, змінювалися кількості полюсів, фокуси математичної моделі (головна ціль створення – так як передбачення та інше).

Але всі результати виявились не вдалим за критерієм точності, що видно зі значень точності та графіків на рисунку 7.9.

6.4 Поліноміальна модель

Наступний тип моделі, що заслуговує на увагу – Polynomial Models. Використовуються поліноміальні моделі для оцінки та прогнозування форми та значень відгуку в діапазоні значень вхідних параметрів. Поліноміальні моделі – це чудовий інструмент для визначення того, які фактори входу мають вплив на реакції виходу і в якому напрямку. Це також найпоширеніші моделі, що використовуються для аналізу експериментів. Квадратична поліноміальна (другого порядку) модель для двох пояснювальних змінних має вигляд рівняння, наведеного нижче (6.3). Поодинокі x -терміни називаються основними ефектами. Члени квадрата називаються квадратичними ефектами і використовуються для моделювання кривизни на поверхні відгуку. Терміни перехресних продуктів використовуються для моделювання взаємодії між змінними [15].

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_{11} x_{21} + \alpha_{22} x_{22} + \alpha_{12} x_1 x_2 + e. \quad (6.3)$$

У більшості інженерних та виробничих задачах при створенні моделі переважно використовуються поліноміальні моделі другого порядку. Очевидно, що поліноміальні рівняння можуть набагато ускладнитися, якщо збільшується кількість змінних, а отже, і кількість перехресних добутоків. Але, все ж, доволі рідко зустрічаються умови взаємодії, що перевищують двофакторний рівень. Це допомагає підтримувати рівняння на керованому рівні.

Коли кількість факторів невелика (менше 5), повне поліноміальне рівняння може бути встановлене за допомогою методу, відомого як множинна регресія. Коли кількість факторів велика, – слід використовувати техніку, відому як поетапна регресія. Більшість програм статистичного аналізу мають можливість поступової регресії. Ми просто вводимо всі умови поліноміальних

моделей і дозволяємо програмному забезпеченню вибирати, які терміни найкраще описують дані [16].

Поліноміальна модель використовує узагальнене поняття передавальних функцій, щоб виразити взаємозв'язок між входом $u(t)$, виходом $y(t)$ та шумом $e(t)$, використовуючи рівняння:

$$A(q)y(t) = \sum_{i=1}^m \frac{B_i(q)}{F_i(q)} u_i(t - nk_i) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t). \quad (6.4)$$

Змінні A , B , C , D і F є поліномами, вираженими в операторі зсуву в часі q^{-1} . u_i – i -й вхід, m – загальна кількість входів, а nk_i – i -та вхідна затримка, що характеризує транспортну затримку. Дисперсія білого шуму $e(t)$ приймається λ . На практиці не всі поліноми одночасно активні. Часто застосовуються більш прості форми, такі як ARX, ARMAX, Output-Error та Box-Jenkins.

Для оцінки потрібно вказати порядок моделі як набір цілих чисел, які представляють кількість коефіцієнтів для кожного полінома, який можна включити у вибрану структуру – na для A , nb для B , nc для C , nd для D та nf для F . Також потрібно вказати кількість зразків nk , що відповідає вхідній затримці – мертвому часу – заданій кількості зразків, перш ніж вихід відповість на вхід. Кількість коефіцієнтів у знаменникових поліномах дорівнює кількості полюсів, а кількість коефіцієнтів у поліномах чисельника дорівнює кількості нулів плюс 1. Коли динаміка від $u(t)$ до $y(t)$ містить затримку nk -зразків, тоді перші nk -коефіцієнти B дорівнюють нулю [17].

Структура моделі ARX. Це зручний метод для моделювання систем з незначним рівнем шуму, який не потрібно розглядати окремо.

Polynomial Models

Structure: ARX: [na nb nk]

Orders: [4 4 1]

Equation: $Ay = Bu + e$

Method: ☒ ARX ☐ IV

Domain: ☐ Continuous ☒ Discrete (1 s)

☐ Add noise integration ("ARIX" model)

Input delay: 0

Name: arx441

Focus: Prediction Initial state: Auto

Regularization... Covariance: Estimate

☐ Display progress Stop iterations

Order Selection Order Editor...

Estimate Close Help

Рисунок 6.11 – Налаштування Polynomial Models

Були протестовані різні налаштування для побудови математичної моделі вищезгаданим методом, але наведене на рисунку 6.11 – виявилось найкращим.

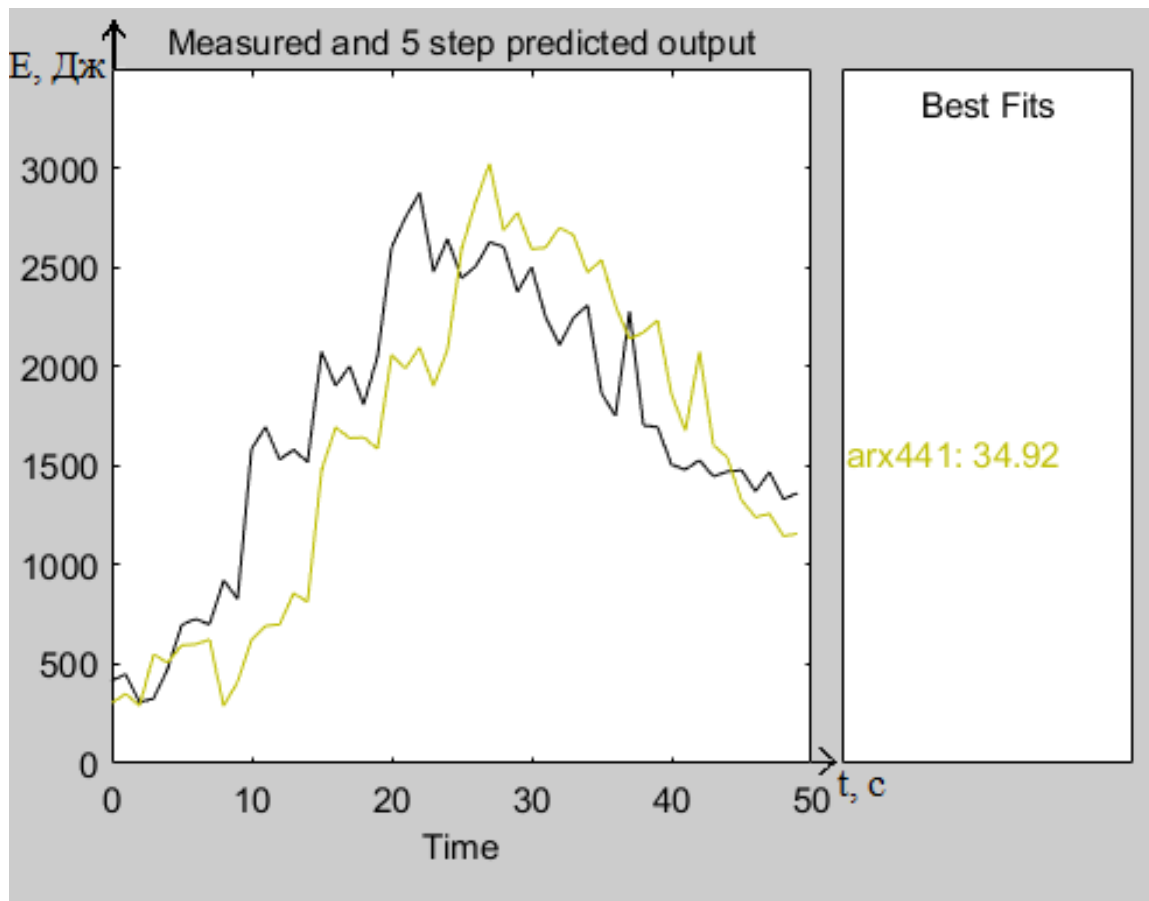


Рисунок 6.12 – Математична модель системи, побудована за допомогою інструмента Polynomial Models

На рисунку 6.12 зображено графік (жовтий колір), що описує поведінку математичної моделі системи. З графіку та з показів у правій частині екрану можна зробити висновок, що утворена модель концептуально співпадає з реальною системою, але не відповідає їй повністю. Співпадіння сягає 34,92%.

Описується вищезгадана система наступними рівняннями:

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t);$$

$$A(z) = 1 - 1.404z^{-1} + 0.2845z^{-2} - 0.1551z^{-3} + 0.2955z^{-4}$$

$$B(z) = 126.9z^{-1} - 33.12z^{-2} - 101.3z^{-3} + 6.206z^{-4}$$

Параметри:

Поліноміальні порядки: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_k = 1$.

Кількість вільних коефіцієнтів: 8.

Відповідність даним оцінки: 67,37% (фокус на моделювання).

The screenshot shows the 'Polynomial Models' window with the following settings:

- Structure:** ARX: [na nb nk]
- Orders:** [4 4 1]
- Equation:** $Ay = Bu + e$
- Method:** ☒ ARX ☐ IV
- Domain:** ☐ Continuous ☒ Discrete (1 s)
- ☐ Add noise integration ("ARIX" model)
- Input delay:** 0
- Name:** arx441
- Focus:** Simulation (dropdown)
- Initial state:** Auto (dropdown)
- Regularization...** (button)
- Covariance:** Estimate (dropdown)
- ☐ Display progress
- Stop iterations** (button)
- Order Selection** (button)
- Order Editor...** (button)
- Estimate** (button)
- Close** (button)
- Help** (button)

Рисунок 6.13 – Налаштування Polynomial Models

Перевіримо як вплине на якість моделі зміна налаштувань (перемикання фокусу моделі).

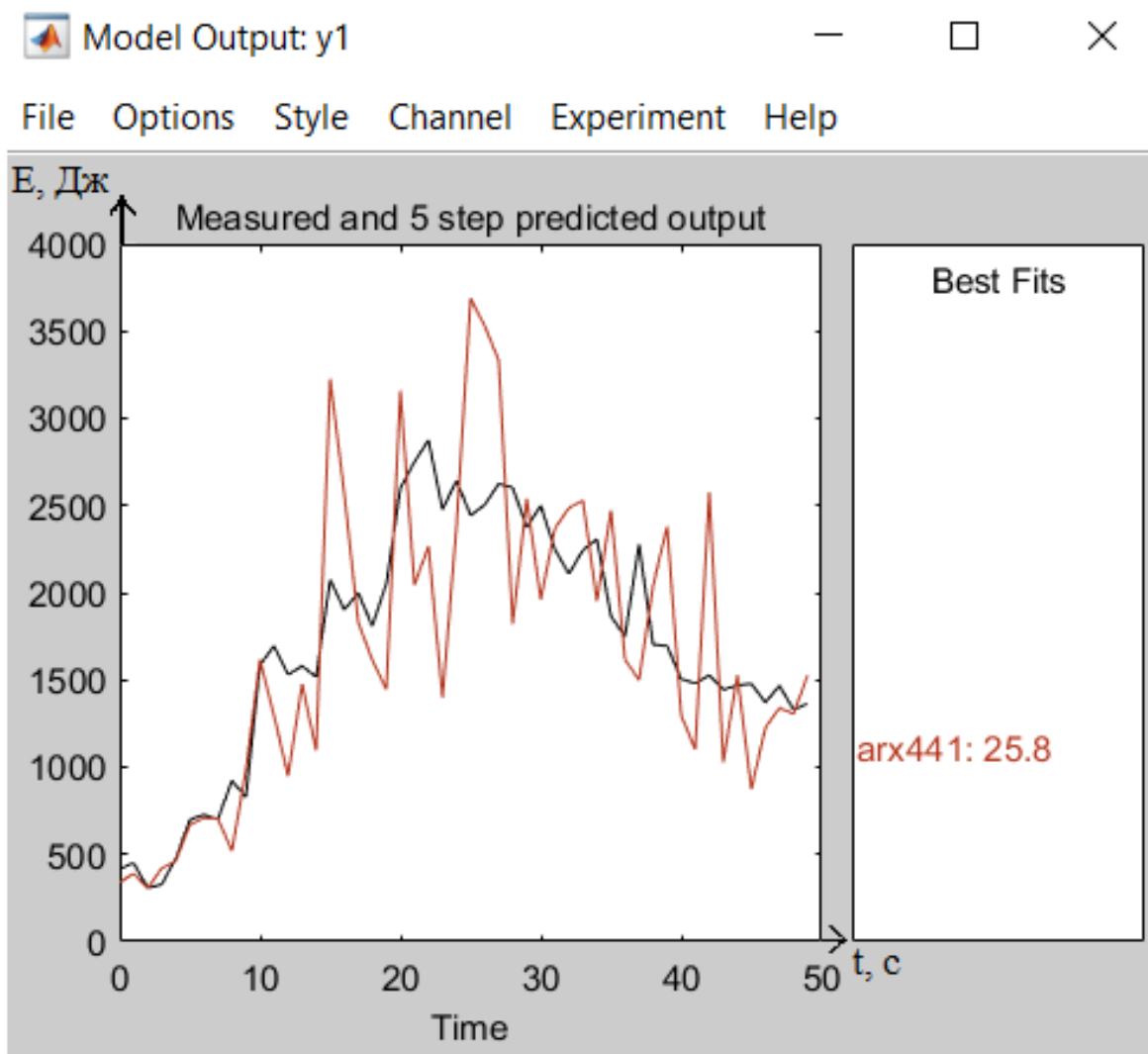


Рисунок 6.14 – Математична модель системи, побудована за допомогою інструмента Polynomial Models (друга)

На рисунку 6.14 зображено графік (червоний колір), що описує поведінку математичної моделі системи. З графіку та з показів у правій частині екрану можна зробити висновок, що утворена модель має гірші показники якості, ніж попередня. Співпадіння сягає 25,8%.

6.5 Нелінійна модель

Наступний метод для розгляду – Nonlinear Models. Нелінійна регресія – це форма регресійного аналізу, при якій дані відповідають моделі, а потім виражаються як математична функція. Проста лінійна регресія пов'язує дві змінні (X та Y) з прямою лінією ($y = mx + b$), тоді як нелінійна регресія пов'язує дві змінні у нелінійному відношенні [18].

Мета моделі – зробити суму квадратів якомога меншою. Сума квадратів – це міра, яка відстежує, наскільки Y спостереження відрізняються від нелінійної (вигнутої) функції, яка використовується для прогнозування Y .

Вона обчислюється шляхом першого знаходження різниці між встановленою нелінійною функцією та кожною точкою Y даних у наборі. Потім кожна з цих різниць підноситься у квадрат. Нарешті, усі квадратні фігури складаються разом. Чим менша сума цих квадратів, тим краще функція відповідає точкам даних у наборі. Нелінійна регресія використовує логарифмічні функції, тригонометричні функції, експоненційні функції, степенні функції, криві Лоренца, функції Гауса та інші методи підгонки.

Нелінійне регресійне моделювання подібне до лінійного регресійного моделювання тим, що обидва прагнуть графічно відстежувати певний вихід моделі на різні вхідні збурення із набору змінних. Розробити нелінійні моделі складніше, ніж лінійні моделі, оскільки функція створюється через ряд наближень (ітерацій), які можуть бути наслідком спроб і помилок. Математики використовують кілька усталених методів, таких як метод Гауса-Ньютона та метод Левенберга-Марквардта [19].

Часто моделі регресії, які на перший погляд здаються нелінійними, насправді є лінійними. Процедура оцінки кривої може бути використана для ідентифікації природи функціональних взаємозв'язків у даних, тому можна вибрати правильну модель регресії, будь то лінійна чи нелінійна. Моделі

лінійної регресії, хоча вони зазвичай утворюють пряму лінію, можуть також утворювати криві, залежно від форми рівняння лінійної регресії. Подібним чином можна використовувати алгебру для перетворення нелінійного рівняння таким чином, щоб імітувати лінійне рівняння – таке нелінійне рівняння називається «внутрішньо лінійним» [20].

Нелінійна модель ARX обчислює вихід у два етапи:

1. Обчислює регресори з поточних і минулих вхідних значень та минулих вихідних даних.

У найпростішому випадку регресори – це затримки входів і виходів, такі як $u(t-1)$ та $y(t-3)$ – стандартні регресори. Також можна вказати власні регресори, які є нелінійними функціями відкладених входів і виходів.

За замовчуванням усі регресори є входами як до лінійних, так і до нелінійних функціональних блоків оцінювача нелінійності. Можна вибрати підмножину регресорів у якості вхідних даних до нелінійного функціонального блоку.

Блок оцінки нелінійності відображає регресори до вихідних даних моделі за допомогою комбінації нелінійних та лінійних функцій. Можна вибрати серед доступних оцінювачів нелінійності, такі, як мережі з деревовидною структурою, вейвлет-мережі та багаторівневі нейронні мережі. Також можна виключити з оцінювача нелінійності або лінійний, або нелінійний функціональний блок.

Nonlinear Models

Configure Estimate

Model name: nlarx1

Model type: Nonlinear ARX Initialize...

Regressors Model Properties

Specify delay and number of terms in standard regressors for output y1:

Channel Name	Delay	No. of Terms	Resulting Regressors
u1	1	5	u1(t-1), u1(t-2), ..., u1(t-5)
Output Channels			
y1	1	5	y1(t-1), y1(t-2)

Note: Model has no custom regressors.

Infer Input Delay... Edit Regressors...

Estimate Close Help

Рисунок 6.15 – Налаштування для Nonlinear Models (Nonlinear ARX, Wavenet network)

Налаштування, що зображене на рисунку 6.15 є найкращим з усіх протестованих налаштувань. Було обрано тип моделі Nonlinear ARX та нелінійність Neural network.

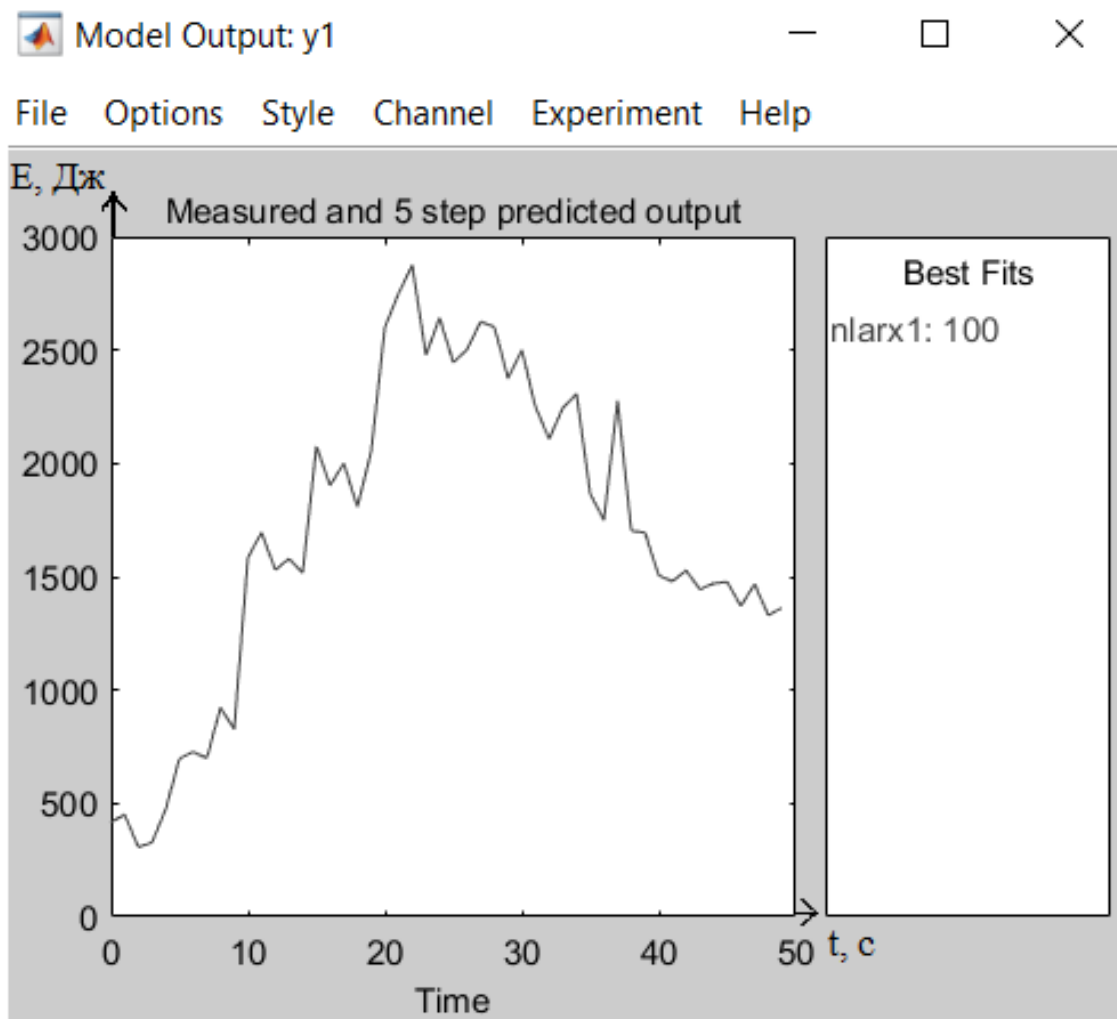


Рисунок 6.16 – графік математичної моделі, побудованої за допомогою Nonlinear Models (Nonlinear ARX, Wavenet network)

Як видно з рисунку 6.16, математична модель, що побудована з вищезгаданими налаштуваннями повністю повторює поведінку реальної системи, точність сягає 100%.

Характеристики:

Стандартні регресори, що відповідають задачі

$$n_a = 5, n_b = 5, n_k = 1$$

Нелінійні регресори:

$y_1(t-1); y_1(t-2); y_1(t-3); y_1(t-4); y_1(t-5); u_1(t-1); u_1(t-2); u_1(t-3); u_1(t-4); u_1(t-5)$.

Нелінійність: хвильова мережа з 34 одиницями

Час вибірки: 1 секунда

Статус: Відповідність даним оцінки: 100% (фокус на прогнозування вихідного значення).

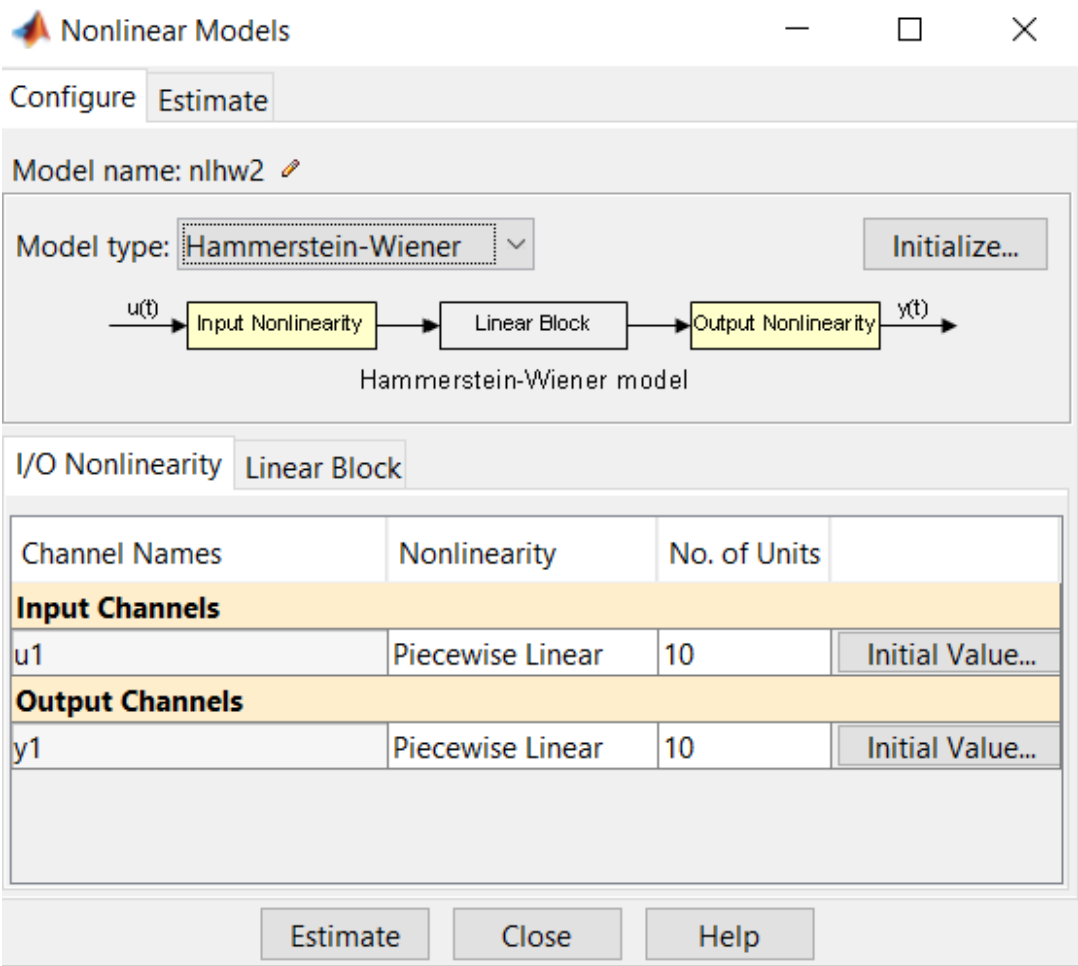


Рисунок 6.17 – Налаштування для Nonlinear Models (Hammerstein-Wiener)

Змінимо тип моделі для перевірки усіх можливих у System Identification Toolbox типів моделі на актуальність для вибірки даних експериментів.

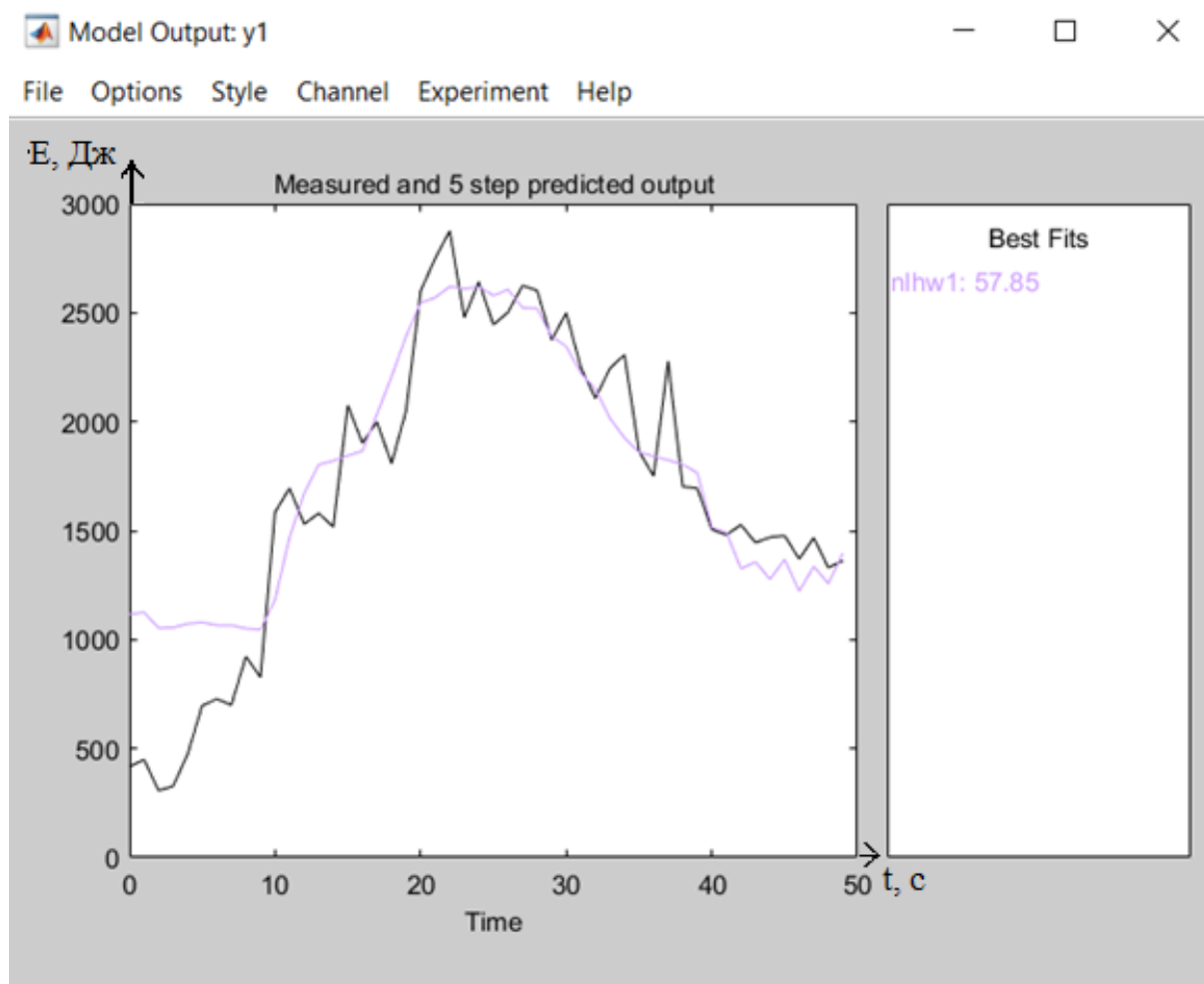


Рисунок 6.18 – графік математичної моделі, побудованої за допомоги Nonlinear Models (Hammerstein-Wiener)

Як видно з рисунку 6.18, математична модель, що побудована вищезгаданими налаштуваннями не повторює поведінку реальної системи, точність сягає 57,85%.

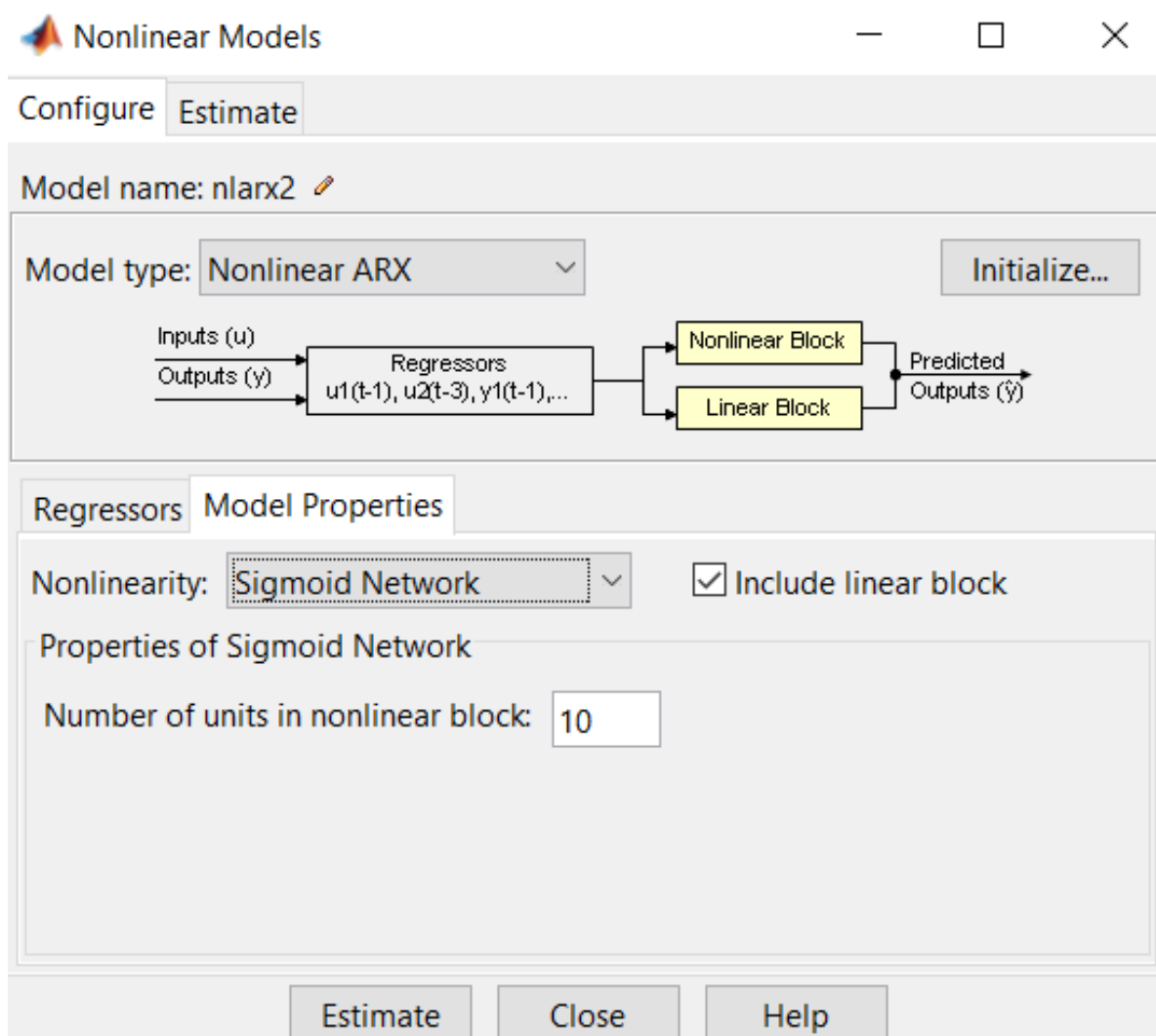


Рисунок 6.19 – Налаштування для Nonlinear Models (Nonlinear ARX, Sigmoid network)

Також відносно непогані значення вдалось досягти за допомогою інструменту Nonlinear Models (Nonlinear ARX, Sigmoid network). Таке налаштування для побудови нелінійної математичної моделі зображено на рисунку 6.19.

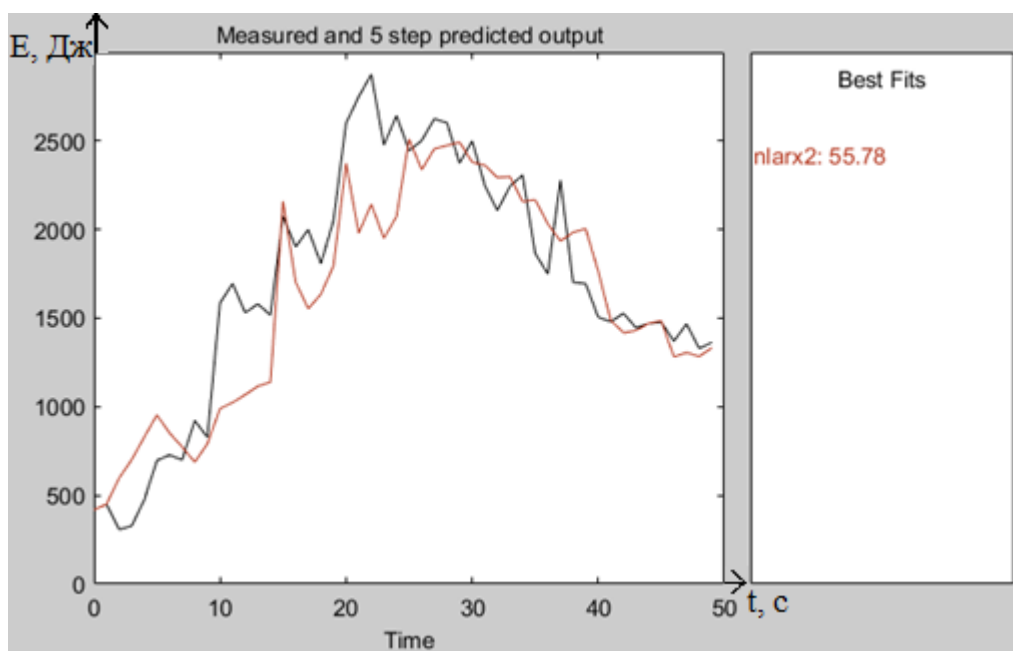


Рисунок 6.20 – графік математичної моделі, побудованої за допомоги Nonlinear Models (Nonlinear ARX, Sigmond network)

Створена математична модель на 55.78% відповідає реальній системі, що є непоганим результатом, але значно гіршим, ніж той, що дає модель побудована Nonlinear Models (Nonlinear ARX, Wavenet network).

На рисунку 6.21 зображено графіки всіх протестованих у цьому розділі математичних моделей. У правій частині зображення всі моделі відсортовані за критерієм максимального співпадіння.

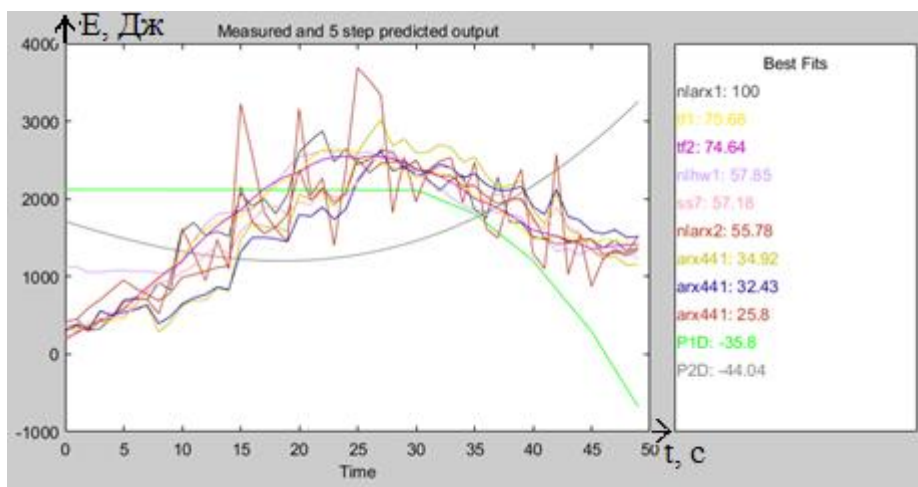


Рисунок 7.20 – Графіки математичних моделей, що були протестовані

6.6 Висновок розділу

У цьому розділі було протестовано інструменти та методи для побудови математичних моделей на основі реальних експериментальних даних. Це допоможе у наступному розділі, який буде присвячено обробці даних, що видає створена модель розроблюваної у роботі системи, використовувати ті математичні моделі, що показали свою точність при роботі з реальними, не імітованими даними. Протестовані методи створення математичних моделей надають змогу створити модель системи, в основі якої є одна з вищевикладених математичних моделей. Така модель може показувати яким є (може бути), імовірно, значення вихідне при тих вхідних значеннях, яких немає у записах, тобто при таких, які не тестувались у експериментах.

Аналогічну модель було створено і для масиву експериментальних даних. Створено її було у середовищі MATLAB/Simulink. В якості математичної моделі було використано модель Nonlinear Models (Nonlinear ARX, Wavelet network), що дає найвищу точність при роботі з даними, що записані в таблиці 6.1.

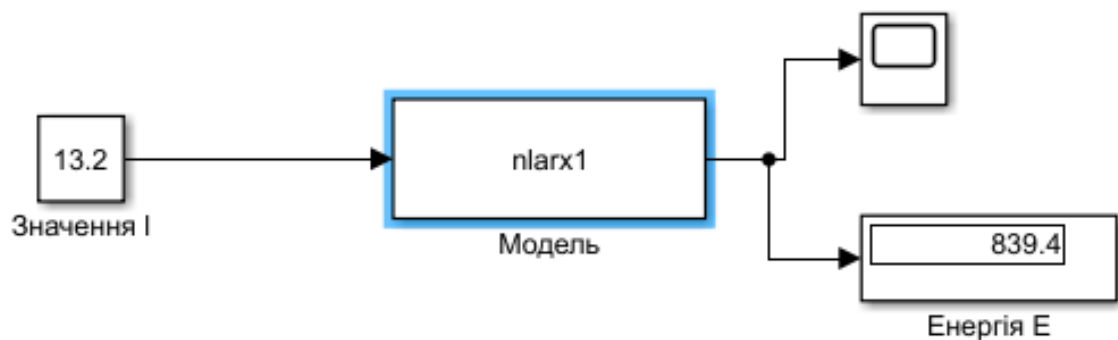


Рисунок 6.22 – Робота моделі, створеної на основі Nonlinear Models (Nonlinear ARX, Wavelet network) у Simulink

Як видно з рисунку 6.22, створена математична модель здатна показувати яким би було значення енергії при такому значенні проміжку, яке не тестувалось у реальному експерименті. Модель видає значення енергії 839.4 Дж при значенні проміжку 13.2. Якщо візуально оцінити таблицю 6.1 – дане значення виглядає цілком логічно та реально.

7 АЛГОРИТМ ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ

Для створення моделі у MATLAB було обрано тип екранів, які збирають на себе теплову енергію. Для найбільш об'єктивної оцінки виділеної енергії було прийняте рішення встановити металеву сферу навколо діода, з певними вирізами, необхідними для підводу обладнання та забезпечення функціонування діода та лазерів. Таке рішення дозволяє перекрити максимальну площу навколо діода, та враховувати випромінення, що розповсюджуються у всіх напрямках.

Отже, навколо діода встановлено металеву кулю, що поглинає теплову енергію. По «паралелях» кулі встановлені термопари, та для кожної паралелі вираховується середнє арифметичне значення температури. Таким чином з усіх рівнів давачів отримано t_1, t_2, \dots, t_n відповідно. Потім визначається середнє арифметичне значення цих температур, що буде вважатися середньою температурою кулі $t_{c.k.}$. Тоді зібрана енергія дорівнює :

$$E = c * m * (t_{a.s.} - t_{a.s.0}), \quad (7.1)$$

де :

E – теплова енергія;

c – теплоємність матеріалу кулі;

m – маса кулі.

Параметр l – проміжок між катодом та анодом (проміжок в діоді) – параметр, що автоматично або в ручному режимі змінюється при кожному експерименті для того, аби визначити його оптимальну величину по критерію максимізації зібраної енергії. Вищезгаданий параметр має змінюватись у певному припустимому інтервалі, при чому можливі наступні підходи:

- 1) зміна між верхньою та нижньою межею з певним кроком;
- 2) зміна із застосуванням чисельних методів пошуку оптимуму.

Параметр T – затримка або випередження спрацьовування лазера відносно спрацьовування розрядників. T автоматично або в ручному режимі змінюється при кожному експерименті для того, аби визначити його оптимальну величину

по критерію максимізації зібраної енергії. Вищезгаданий параметр має змінюватись у певному припустимому інтервалі, при чому можливі наступні підходи:

- 1) зміна між верхньою та нижньою межею з певним кроком;
- 2) зміна із застосуванням чисельного метода для пошуку оптимуму.

Спочатку встановлюється статичне значення T та проводяться експерименти з пошуку максимального енерговиділення (E) зі зміною l , знаходиться оптимальне l . Отримане значення l фіксується та запускається алгоритм пошуку оптимального T . Як результат – отримується оптимальна комбінація T, l .

Результатом роботи даного алгоритму є таблиця, що автоматично формується та містить у собі такі дані: E, l, T .

У таблиці виконується сортування по значенню E . Таким чином можна буде визначити при яких параметрах вдалось отримати найбільше теплової енергії.

8 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ MATLAB/SIMULINK

8.1 Оброблення експериментальних даних

На основі вищеописаного алгоритму було розроблено модель у середовищі Simulink, яка представлена на рисунку 8.1.

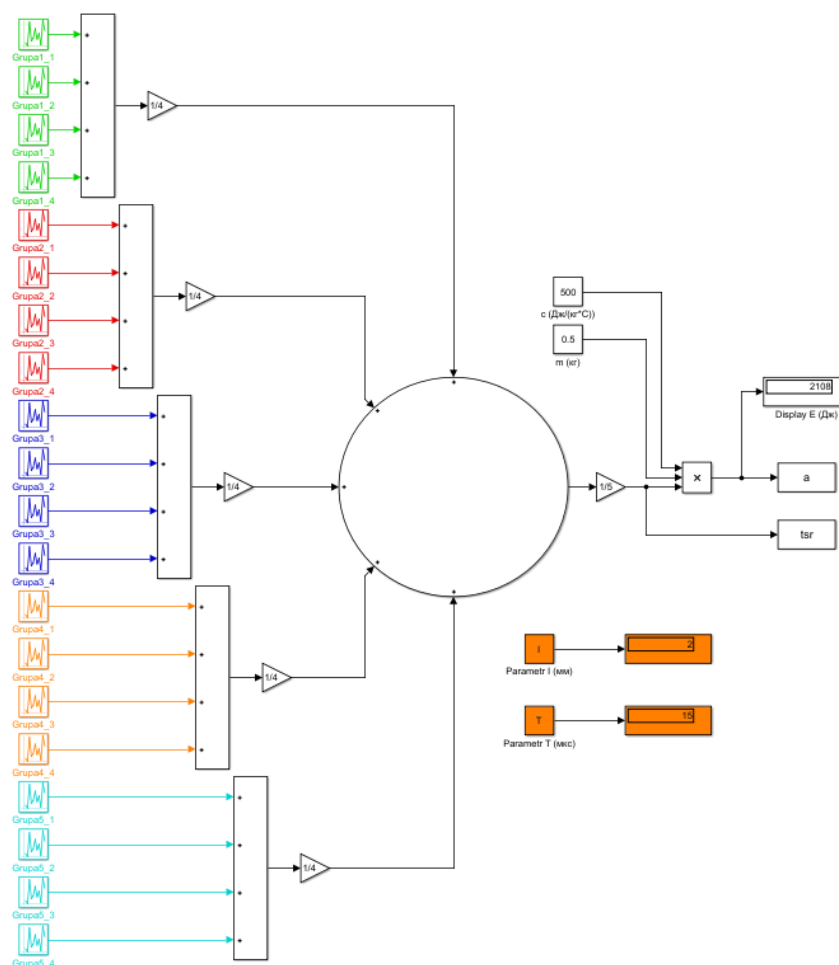


Рисунок 8.1 – Модель у Simulink

Як видно з рисунку 8.1, робота моделі розпочинається з надходження температур з термопар, що повністю співпадає з тим, як працює реальна система. Було створено 5 груп термопар, що розташовуються по п'яти, взаємо паралельним, горизонтальним площинам. «Grup1_1 – Grup1_4» – давачі

температури, що розташовані концентрично відносно діода у площині, наближеній до полюса, зі сторони катода. «Grupa2_1 – Grupa2_4» – давачі температури, що знаходяться на ближчій до зазору та «екватора» сфери площині. «Grupa3_1 – Grupa3_4» – давачі температури на «екваторі» сфери, знаходяться на рівні зазору діода. «Grupa4_1 – Grupa4_4» – давачі, що симетричні до «Grupa2_1 – Grupa2_4». «Grupa5_1 – Grupa5_4» – давачі температури, що розташовані концентрично відносно діода у площині, наближеній до полюса, зі сторони анода. У процесі моделювання ці температури, а точніше зміна температури, генеруються за допомогою створеного скрипта у MATLAB.

Наступний етап – це надходження змін температур на суматори. Тут відбувається складання змін температур з усіх давачів однієї групи. Для розрахунку середньої зміни температури сфери – середні зміни температури з усіх груп складаються та діляться на кількість груп. Оскільки товщина стінок сфери рівна – вищезгадана логіка розрахунку її середньої температури є припустимою. Енергія, поглинена сферою, може бути визначена за формулою

$$E = c * m * (t_{a.s.} - t_{a.s.0}), \quad (8.1)$$

де :

E – теплова енергія;

c – теплоємність матеріалу сфери;

m – маса сфери.

В результаті отримана кількість енергії у Джоулях, що була зібрана сферою (рисунок 9.2).

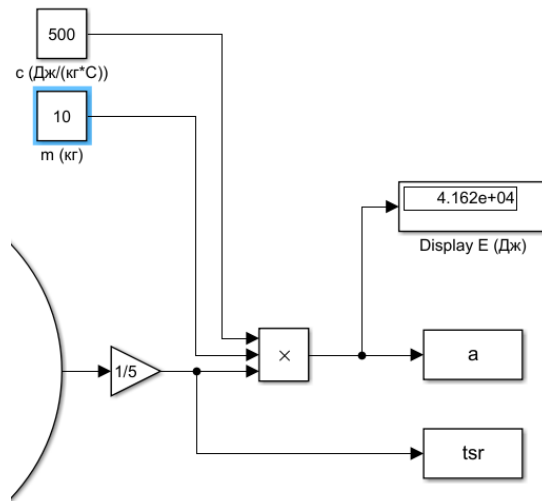


Рисунок 8.2 – Підрахунок зібраної енергії та передача значень у Workspace

За допомогою програмного коду виконується перемикання параметрів установки, таких як зазор (l) та затримка спрацювання лазерів (T). Значення цих величин також відображаються при кожному експерименті (ітерації спрацювання моделі). Відображення цих параметрів показано на рисунку:

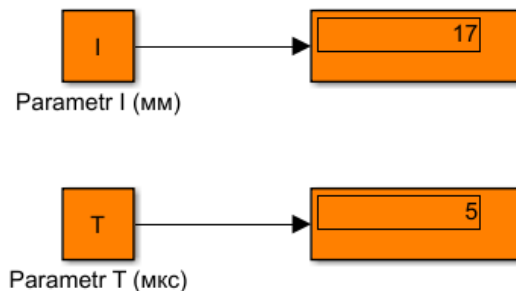


Рисунок 8.3 – Відображення параметрів проведення експерименту

Параметр «l» характеризує зазор між катодом та анодом діода, що має вплив на результат експерименту та цей вплив потрібно зафіксувати та дослідити. Даний параметр, за фізичною моделлю повинен змінюватися в діапазоні від 1мм до 20мм.

Параметр «T» характеризує собою затримку спрацювання лазерів, відносно замикання конденсаторів, що ініціює пробій діода.

Вискоковольтний розряд відбудеться і без участі лазерів, що опромінюють катод (чи анод), але, як було зазначено раніше, лазерне опромінення металу створюватиме плазму у дослідній камері, що покращуватиме фізичні характеристики пробою діода. Підсвічування лазерами елементів діода є актуальним, як до замикання розрядників, так і після, тому значення затримки спрацювання лазерів може бути, як від'ємним, так і додатнім.

Проведені експерименти записуються у таблицю зі стовпцями, що містять кількість поглиненої енергії сферою, значення затримки спрацювання лазера, значення зазору в діоді.

Перша таблиця слугує журналом, у неї записуються всі експерименти по черзі, а точніше – виміряні значення при експериментах (таблиця 9.1).

Таблиця 8.1 – Журнал експериментів, записаних по черзі, з наступними стовпцями: номер експерименту, значення енергії, значення середньої температури сфери, значення затримки спрацювання лазерів, значення зазору. «resultTable».

1	41758,56	8,351712	0	20
2	42417,14	8,483427	0	15
3	40444,7	8,08894	0	10
4	40349,14	8,069829	0	5
5	41236,44	8,247287	0	1
6	41160,26	8,232053	0	11
7	41818,62	8,363724	0	12
8	39949,81	7,989962	0	13
9	41439,53	8,287906	0	14
10	40220,92	8,044184	0	15
11	43252,77	8,650554	0	16
12	40111,66	8,022331	0	17
13	41504,89	8,300978	0	18

14	42333,21	8,466641	0	19
15	43054,36	8,610872	-10	16
16	39575,52	7,915103	-5	16
17	38568,23	7,713646	0	16
18	42153,37	8,430673	5	16
19	41723,04	8,344608	10	16
20	39318,18	7,863636	-15	16
21	43284,62	8,656924	-14	16
22	41618,07	8,323613	-13	16
23	40667,98	8,133595	-12	16
24	42077,64	8,415527	-11	16
25	40562,12	8,112424	-10	16
26	42676,57	8,535315	-9	16
27	43096,14	8,619228	-8	16
28	40861,63	8,172327	-7	16
29	40487,25	8,09745	-6	16
30	41104,32	8,220863	-5	16

Дана таблиця, окрім функції збереження інформації, слугує і технічною таблицею. Вона є першим місцем, де всі дані збираються разом та по порядку. Далі ці дані можна обробляти.

Далі рядки з першої таблиці (журналу експериментів) передаються у другу таблицю «sortResultTable». Але у другій таблиці, за допомогою програмного коду дані сортуються. Рядки у вищезгаданій таблиці сортуються за значеннями у стовпчику з величинами «Е» від більшого до меншого. Таким чином, результатом роботи даної моделі є таблиця, що по порядку показує оптимальні значення «Т» та «І» по критерію максимізації енергії, та, власне, значення «Е», що відповідає конкретним параметрам експерименту. Такою другою таблицею є таблиця 8.2.

Таблиця 8.2 – Таблиця з відсортованими, за значенням енергії, результатами експериментів з наступними стовпцями: номер експерименту, значення енергії, значення середньої температури сфери, значення затримки спрацювання лазерів, значення зазору.

N	E	'tsr'	'T'	'T'
'21'	'43284.6225'	'8.6569'	'-14'	'16'
'11'	'43252.7698'	'8.6506'	'0'	'16'
'27'	'43096.1383'	'8.6192'	'-8'	'16'
'15'	'43054.3597'	'8.6109'	'-10'	'16'
'26'	'42676.5749'	'8.5353'	'-9'	'16'
'2'	'42417.1374'	'8.4834'	'0'	'15'
'14'	'42333.2064'	'8.4666'	'0'	'19'
'18'	'42153.3664'	'8.4307'	'5'	'16'
'24'	'42077.637'	'8.4155'	'-11'	'16'
'7'	'41818.6211'	'8.3637'	'0'	'12'
'1'	'41758.5583'	'8.3517'	'0'	'20'
'19'	'41723.0379'	'8.3446'	'10'	'16'
'22'	'41618.0651'	'8.3236'	'-13'	'16'
'13'	'41504.8907'	'8.301'	'0'	'18'
'9'	'41439.5297'	'8.2879'	'0'	'14'
'5'	'41236.4352'	'8.2473'	'0'	'1'
'6'	'41160.2634'	'8.2321'	'0'	'11'
'30'	'41104.317'	'8.2209'	'-5'	'16'
'28'	'40861.6336'	'8.1723'	'-7'	'16'
'23'	'40667.9766'	'8.1336'	'-12'	'16'
'25'	'40562.1188'	'8.1124'	'-10'	'16'
'29'	'40487.2515'	'8.0975'	'-6'	'16'
'3'	'40444.7025'	'8.0889'	'0'	'10'

'4'	'40349.1442'	'8.0698'	'0'	'5'
'10'	'40220.9191'	'8.0442'	'0'	'15'
'12'	'40111.6565'	'8.0223'	'0'	'17'
'8'	'39949.8085'	'7.99'	'0'	'13'
'16'	'39575.5161'	'7.9151'	'-5'	'16'
'20'	'39318.1786'	'7.8636'	'-15'	'16'
'17'	'38568.2285'	'7.7136'	'0'	'16'

8.2 Розроблення моделі у пакеті MATLAB/Simulink

System Identification Toolbox будучи одним з додатків MATLAB, призначений для побудови математичних моделей динамічних систем. Для, власне, побудови математичної моделі необхідно вказати на масив даних, які є входом системи, що буде моделюватись, та на масив даних, які є виходом системи [20]. Вищезгаданий застосунок розглядає систему, як чорний ящик, та будує модель опираючись тільки на вхід та вихід об'єкта. Такі властивості роблять даний інструмент дуже зручним та корисним для створення математичної моделі динамічних систем [22].

Набір інструментів Identification Toolbox забезпечує такі методи аналізу систем, як максимальна ймовірність, мінімізація помилок передбачення та системна ідентифікація підпростору. Щоб представити нелінійну динаміку системи, можна розглянути моделі Гаммерштейна-Вінера та нелінійні моделі ARX з нелінійною вейвлетною мережею, моделі з деревовидними розгалуженнями та сигмовидною мережею [23].

Для створення математичної моделі системи керування зазором та лазерами, у System Identification Toolbox було перенесено дані з минулого розділу про залежність отриманої енергії від зазору діода та затримки

спрацювання лазерів. Таким чином входом системи представлено значення «Т» та «І», а виходом – значення «Е». Було проведено моделювання за допомогою різних методів для знаходження такого методу, що забезпечив би створення математичної моделі системи найвищої якості. За параметром, що виводиться у правій частині екрану (відповідність поведінки математичної моделі реальній системі) [24], було обрано такий метод побудови, що найбільш точно відтворює реальну картину експериментів.

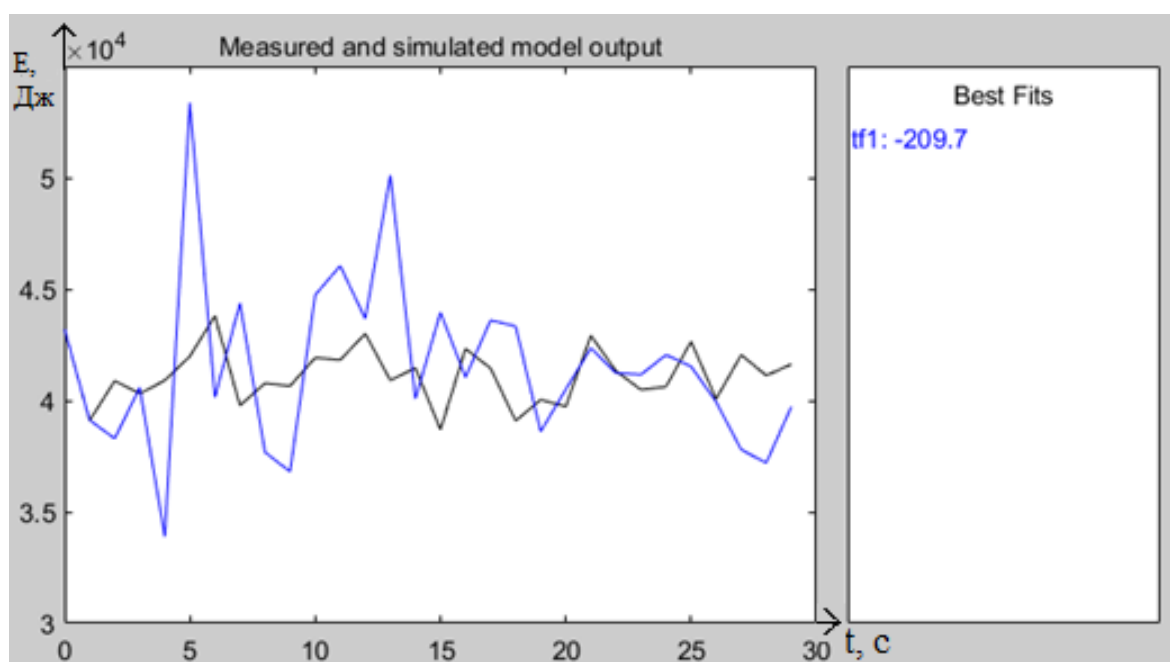


Рисунок 8.4 – Transfer function models

На рисунку 8.4 зображено порівняння роботи математичної моделі, що побудована методом Transfer function (синій графік) та реальної поведінки системи (чорний графік). З графіків та значення у вікні «Best Fits» можна зробити висновок, що побудована математична модель погано імітує поведінку реальної системи.

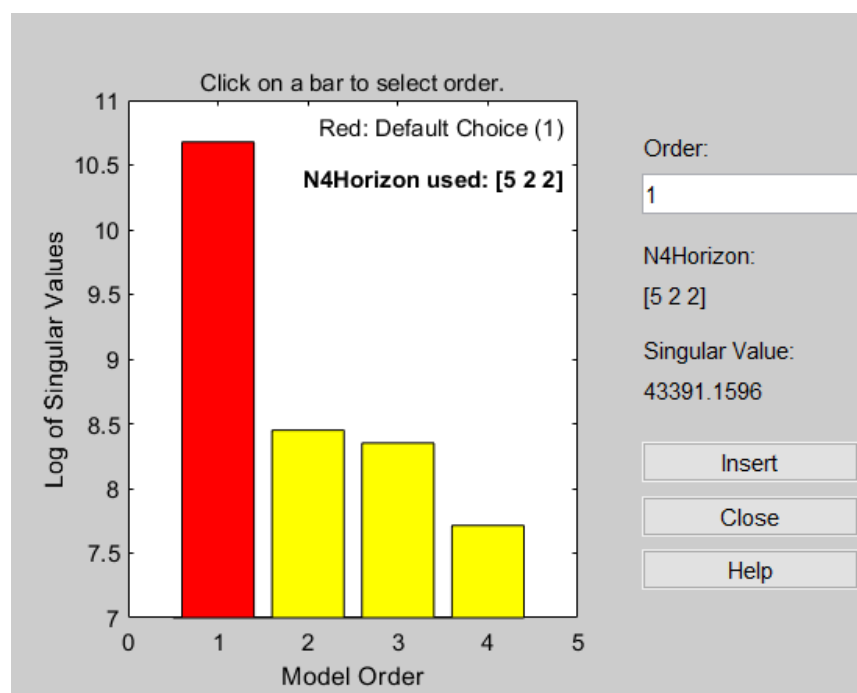


Рисунок 8.5 – Вибір найкращої моделі зі State space models

Використаємо інструмент «State space models». На рисунку 8.5 – зображено рекомендації інструмента щодо вибору порядку системи. Було обрано перший порядок.

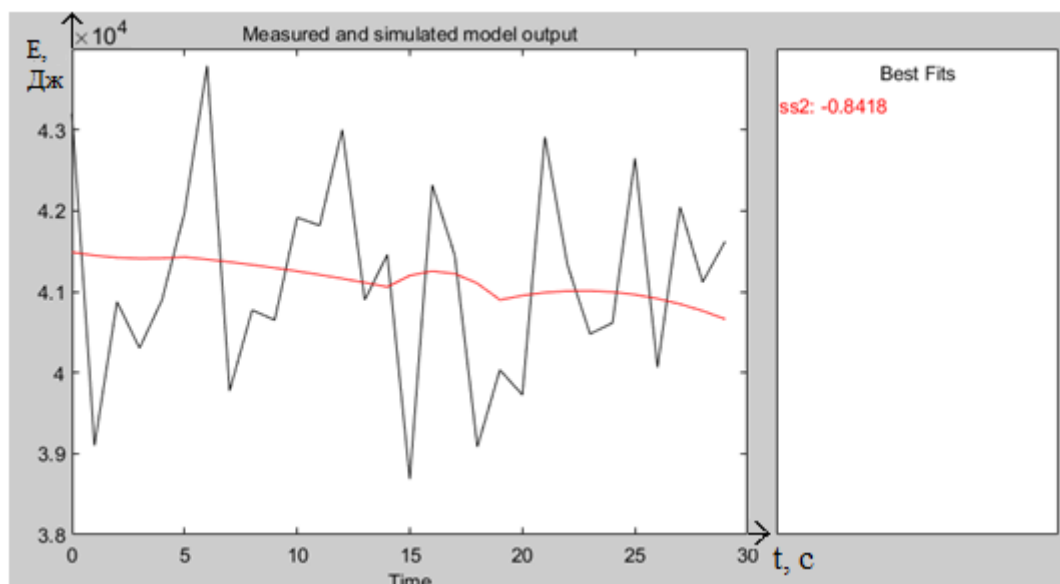


Рисунок 8.6 – State space models

З рисунку 8.6 можна зробити висновки, що модель побудована за допомогою «State space models» не справляється з відтворенням реальних

значень експериментів. Поведінка цієї моделі відображена червоним графіком.

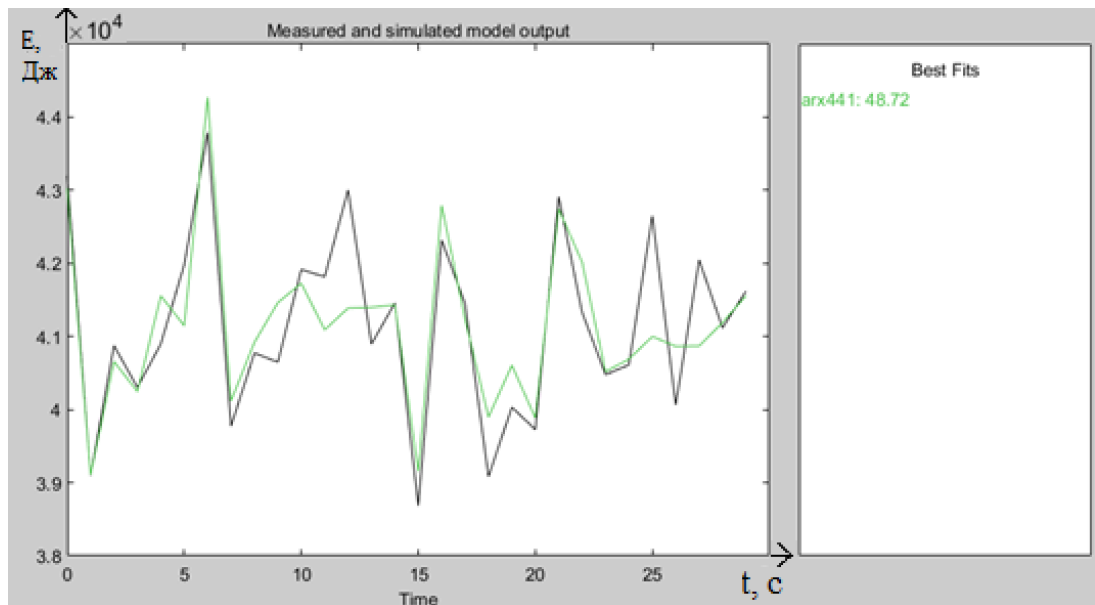


Рисунок 8.7 – Polynomial models

На рисунку 8.7 графік зеленого кольору відображає поведінку математичної моделі, що була створена за допомогою інструменту «Polynomial models». Можна стверджувати, що така модель вже відображає тенденцію поведінки реальної системи, але не точно. Точність – 48.72%.

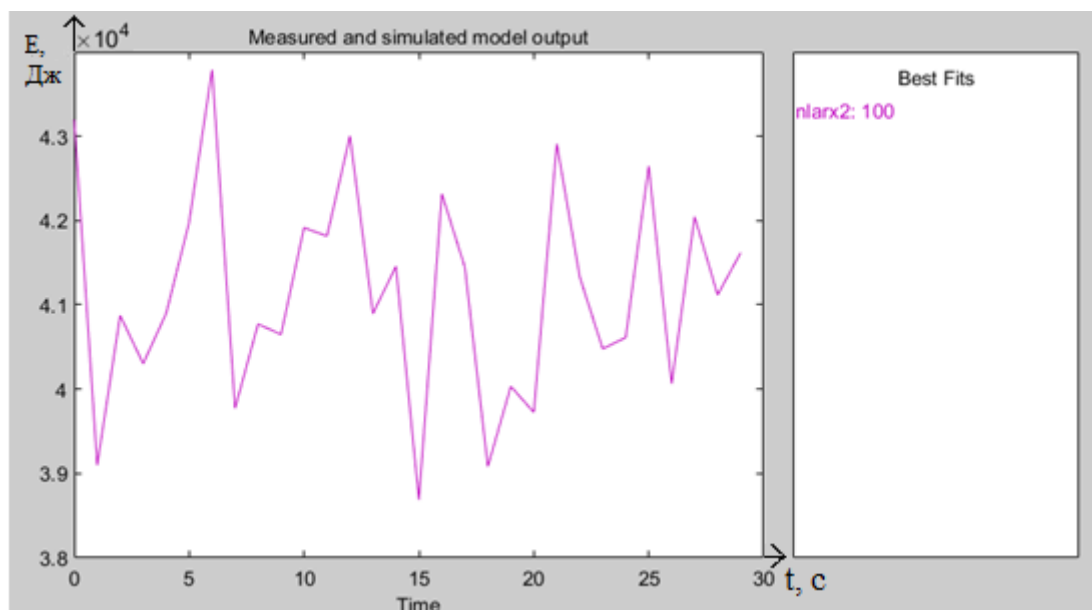


Рисунок 8.7 – Nonlinear models (Sigmond Network)

Найкращий результат у створенні математичної моделі було досягнуто за допомогою «Nonlinear models (Sigmond Network)». Як видно з рожевого графіку та значення точності (рисунок 8.7) – така модель на 100% повторює поведінку системи.

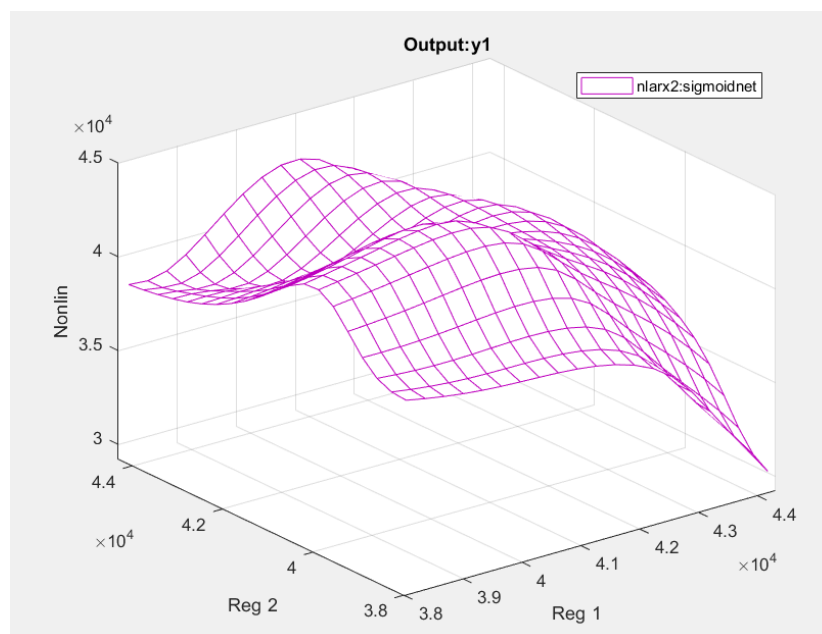


Рисунок 8.8 – Nonlinear ARX model plot

Рисунок 8.8 ілюструє графічне, тривимірне представлення моделі, що була створена за допомогою «Nonlinear models (Sigmond Network)».

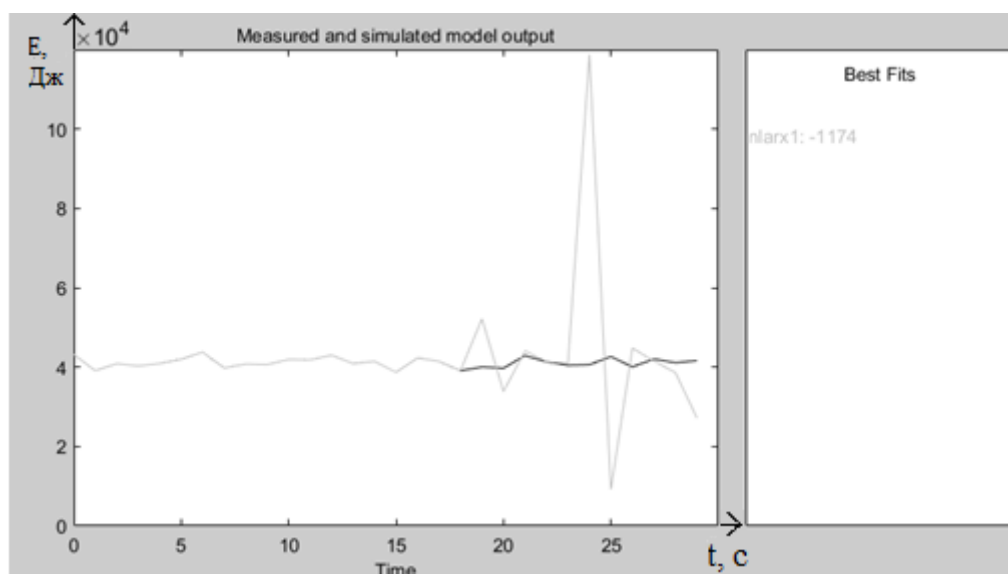


Рисунок 8.9 – Nonlinear models (Wavelet Network)

Математична модель, що створювалась методом «Nonlinear models (Wavelet Network)» – зовсім не відповідає дійсності, що підтверджує рисунок 8.9.

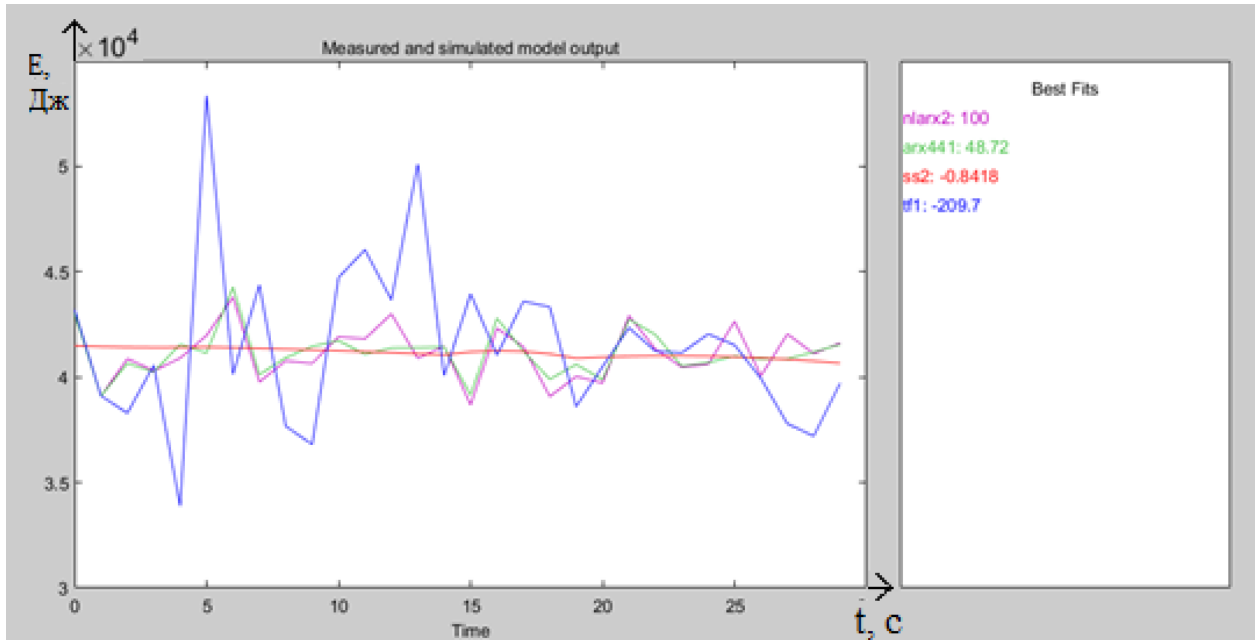


Рисунок 8.10 – Результат моделювання у Identification toolbox

Як видно з графіків – найкраще процес відтворює Polynomial models та Nonlinear models (Wavelet Network). Створені математичні моделі можна перемістити у Simulink, де їх буде зручно використовувати. За допомогою утворених моделей можна виконати відтворення значення енергії для таких значень «l» та «T», які не були протестовані в експериментах.

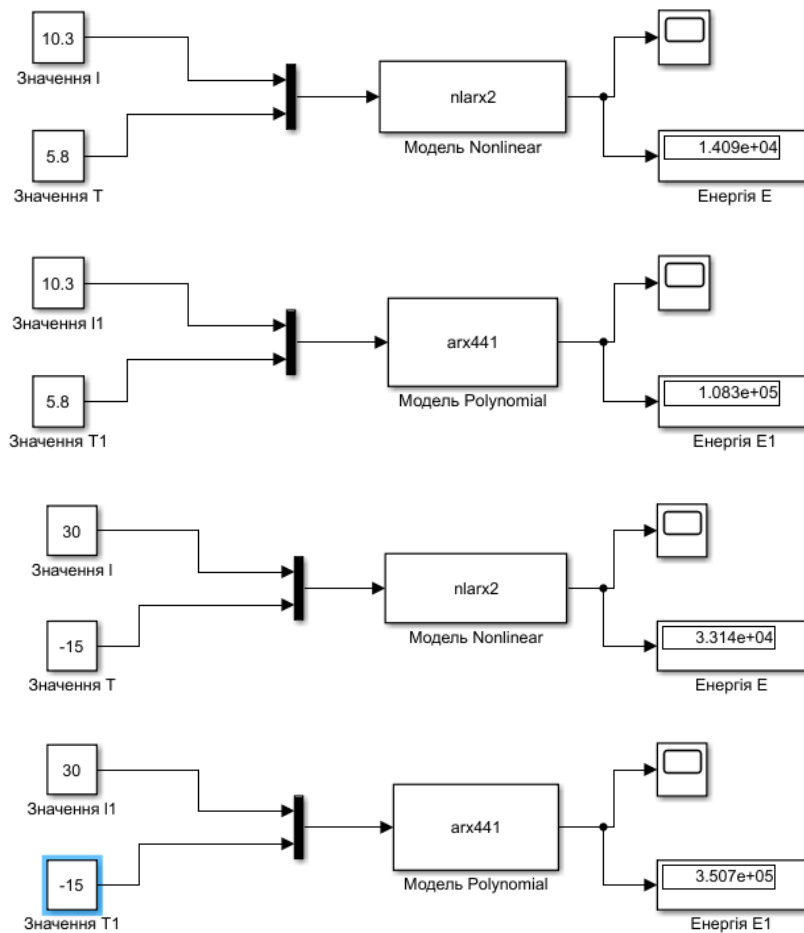


Рисунок 8.11 – Прогнозування значення енергії

Для верифікації отриманих моделей було застосовано вибірку, яка не входила до даних, на основі яких створювалися моделі. Як видно з рисунок 9.11, отримані значення енергії для Polynomial models та Nonlinear models відповідають реальним, що свідчить про адекватність отриманих моделей реальному процесу, що розглядається.

8.3 Висновки до розділу

Результатом описаної роботи та досліджень – є модель, що імітує реальний експеримент, отримує дані з датчиків. Отримана інформація оброблюється на кожній ітерації за допомогою створеного алгоритму, що

дозволяє зменшити кількість експериментів для пошуку найкращого результату. Отримані дані у автоматичному режимі оброблюються таким чином, що знаходяться найбільш вдалі налаштування по критерію максимізації отриманої енергії. На основі змодельованих експериментальних даних було побудовано математичну модель процесу за допомогою MATLAB/Identification toolbox. Така математична модель дає змогу прогнозувати значення виходу системи (енергії) для подальших досліджень експериментальної установки. По суті, вона дає змогу дізнатись яким би було значення енергії при таких значеннях проміжку діода та затримки спрацювання лазера, які не тестувались. Це відкриває значні можливості для швидкого пошуку оптимуму.

ВИСНОВКИ

У даній дисертації було описано ідею створення системи керування роботою лазерного обладнання та переміщення аноду в діоді, що має за мету покращення роботи експериментальної установки та автоматичний підбір оптимальних параметрів експерименту. Розраховується, що розроблювана система зробить можливим автоматичний збір даних з експериментів, таких як температура екранів та налаштовані параметри, крім того, за допомогою алгоритму, буде виконуватись певне керування роботою лазерів та двигуна, що переміщує анод на основі зібраних результатів експериментів, що зробить можливим пришвидшити пошук оптимальних налаштувань для кожної з конфігурацій, що застосовуються.

Було розроблено та реалізовано у середовищі MATLAB/Simulink підсистему, що покращує параметри імпульсу потужності пробою і як наслідок – енерговихід ініційованої реакції шляхом утворення плазми в діоді у потрібний час за допомогою лазерів. Також було розроблено функцію зміни проміжку діода шляхом переміщення аноду в автоматичному режимі. Дані розробки полягли в основу проекту по розробці реального прототипу системи, що буде автоматично виконувати зміну проміжку діода та параметри спрацьовування лазерної техніки. Виконувати такі налаштування система буде на основі зібраної інформації з реальних експериментів та обробленої алгоритмом, що сформульовано у даній дисертації.

Описаний в роботі алгоритм аналізу та обробки даних виконує оптимальний перебір параметрів, таких як проміжок діода та час спрацьовування лазерів. Метою вищезгаданого перебору є максимізація виділеної енергії, яка фіксується за допомогою розробленої системи екранів та датчиків.

Для розрахунків параметрів лазерної техніки було враховано всі базові теоретичні засади, що характерні для лазерних променів та для утворення плазми.

Було проведено роботу по моделюванню роботи алгоритму вибору оптимальних параметрів та по моделюванню роботи установки та отриманню експериментальних даних. Втілено вищезгадані моделі у життя було завдяки програмному середовищу MATLAB.

Використовуючи System Identification Toolbox, було створено математичні моделі, що зі значною точністю можуть генерувати результати експериментів. Обучаються такі моделі на вибірці існуючих даних, що були отримані в реальних експериментах. Створення математичної моделі є вкрай важливою частиною, оскільки вона дозволить отримувати припущення чи є можливим більше значення виділеної енергії при тих параметрах (умовах), що не були протестовані в експериментах. Наприклад, відомо, що високі значення виділеної енергії фіксуються при проміжках 7 та 8 мм та при спрацюванні лазерів за 2 та 3 мікросекунди до спрацювання розрядників. У такому випадку математична модель може підказати, що за її логікою – вищі значення енергії будуть досягнені при проміжку 7,4 мм та випередженні лазерами спрацювання розрядників на 2,8 мкс. Безсумнівно, ці налаштування слід буде перевірити і, з високою вірогідністю, вони й насправді можуть опинитися оптимальними.

Значну увагу в дисертації було приділено теоретичним засадам тих фізичних процесів, що мають бути покращенні завдяки вирішеним задачам управління та автоматизації. Також було детально описано основні принципи, що лежать в основі роботи установки, до якої, власне, і буде додана розроблювана у дисертації система, в результаті чого, описані в проекті ідеї втіляться у життя та, за обґрунтованими припущеннями, зможуть покращити результати експериментів, а саме – збільшити кількість виділеної енергії.

Окремий розділ було присвячено опису роботи лазерів та підрахунку параметрів лазерної техніки, що були б достатніми для формування необхідної

кількості плазми в діоді для покращення форми імпульсу потужності при пробої діода.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Controlled Nucleosynthesis / Stanislav Adamenko, Franco Selleri, Alwyn van der Merwe. // Springer Science & Business Media. – 2007. – С. 16–40.
2. r-Process Nucleosynthesis in Hot Accretion Disk Flows from Black Hole-Neutron Star Mergers / R. Surman, G. C. McLaughlin, M. Ruffert, H.-Th. Janka, W. R. Hix. // The Astrophysical Journal 679. – 2008. – С. 5-30.
3. Ядерный синтез: малые игроки/ Уэйт Гиббс // В мире науки. — 2017. – № 1/2. – С. 36-45.
4. The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation/ Gould, R. Gordon // The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, the University of Michigan. – 1959. – С. 128.
5. Laser / Taylor, Nick // Simon & Schuster – 2000. – С.168.
6. Lasers / Siegman, Anthony E. // University Science Books. – 1986. – С. 2-5.
7. Quantum Photonics, 2nd edition / Pearsall, Thomas // Graduate Texts in Physics. Springer. – 2020.
8. Beam: The Race to Make the Laser / Hecht, Jeff // Oxford University Press. – 2005. – С. 10-13.
9. <https://ekspla.com/> (дата звернення 01.05.2020).
10. <https://www.mathworks.com/> (дата звернення 28.04.2020).
11. Factorial Design for Efficient Experimentation: Generating Informative Data for System Identification / Spall, J. C. // IEEE Control Systems Magazine, vol. 30(5) – 2010. – С. 38–53.
12. System identification / Torsten Söderström, Stoica P. // New York: Prentice Hall – 1998. – С. 5-8.
13. Intelligent Control Systems: An Introduction with Examples / Katalin M. Hangos; R. Lakner & M. Gerzson // Springer. – 2003 – С. 254.

14. Modeling of dynamic systems with modulation by means of Kronecker vector-matrix representation / Vasilyev A.S.; Ushakov A.V. // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2015. – C 87-90.
15. Frequency and Regression Analysis / R.J.Oosterbaan // International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen, The Netherlands. – 1994. – C. 175-224.
16. Drainage research in farmers' fields: analysis of data / R.J.Oosterbaan // Part of project “Liquid Gold” of the International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen, The Netherlands. – 2002.
17. Statistical Methods for Engineers and Scientists / Bethea, R. M.; Duran B.S.; Boullion, T. L. // New York: Marcel Dekker. – 1985. C. 55-65.
18. Data Fitting in Dynamical Systems / Schittkowski K. // Boston: Kluwer. – 2002. – C. 38.
19. Signals and systems, 2nd ed / Bernd Girod, Rudolf Rabenstein, Alexander Stenger // Wiley. – 2001. – C. 50.
20. Ordinary differential equations / Birkhoff, Garrett; Rota, Gian-Carlo // New York: John Wiley & Sons. – 1978. – C. 135.
21. System Identification: Theory for the User, 2e / Lennart Ljung, Linköping University // Prentice Hall. – 1999. C. 79.
22. Modeling MR-dampers: a nonlinear blackbox approach / Gang Jin; Sain, M.K.; Pham, K.D.; Billie, F.S.; Ramallo, J.C. // Proceedings of the 2001 American Control Conference. – 2001. C. 24.
23. Learning modular and transferable forward models of the motions of push manipulated objects Autonomous Robots / Kopicki, Marek and Zurek, Sebastian and Stolkin, Rustam and Moerwald, Thomas and Wyatt, Jeremy L. // Springer. 41 (5). – 2017. – C. 1061–1082.
24. Model predictive neural control of a high-fidelity helicopter model / Eric Wan and Antonio Baptista and Magnus Carlsson and Richard Kiebutz and

Yinglong Zhang and Alexander Bogdanov // AIAA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2001. – C. 567.

ДОДАТОК А. Лістинг

```
clc;
clear all;
close all;
% час затримки між моделюваннями
p=0;
open('Diplom2.slx');
% Діапазон зміни змінної I
Id=[20 15 10 5 1];
% Діапазон зміни змінної T
Td=[-10 -5 0 5 10];
% Встановлюємо початкове значення T=0 (третій елемент
масиву Td)
T=Td(3)
% Проводимо серію дослідів для усіх значень змінної з
масиву Id
for i=1:5
    I=Id(i);
    rng shuffle
    r=round(randi([0 100],1,20));
    Grupa1_1=r(1);
    Grupa1_2=r(2);
    Grupa1_3=r(3);
    Grupa1_4=r(4);
    Grupa2_1=r(5);
    Grupa2_2=r(6);
    Grupa2_3=r(7);
    Grupa2_4=r(8);
    Grupa3_1=r(9);
    Grupa3_2=r(10);
    Grupa3_3=r(11);
```

```

Grupa3_4=r(12);
Grupa4_1=r(13);
Grupa4_2=r(14);
Grupa4_3=r(15);
Grupa4_4=r(16);
Grupa5_1=r(17);
Grupa5_2=r(18);
Grupa5_3=r(19);
Grupa5_4=r(20);

sim('Diplom2');
tabelI(i)=a;
resultTable(i,1)=i;
resultTable(i,2)=a;
resultTable(i,3)=tsr;
resultTable(i,4)=T;
resultTable(i,5)=I;
pause(p);
end

% Знаходимо максимальне значення енергії із усіх дослідів
max_table=max(tabelI);
% Визначаємо індекс номера елемента масиву Id за якого
значення I енергія
% досягнула найбільшого значення
for i=1:5
    if tabelI(i)==max_table
        i_I_max=i
        break;
    end
end

% Генеруємо новий діапазон значень Id2 [I_E_max-4
I_E_max+4] з кроком 1

```

```

% де I_E_max значення змінної I_E_max при якому енергія
досягнула максимуму
if Id(i_I_max)~=1
    Id2=Id(i_I_max)-4:Id(i_I_max)+4;
else
    Id2=Id(i_I_max):Id(i_I_max)+4;
end
% Проводимо дослід для цього діапазону I та визначаємо
енергію сигналу
for i=1:length(Id2)
    I=Id2(i);
    rng shuffle
    r=round(randi([0 100],1,20));
    Grupa1_1=r(1);
    Grupa1_2=r(2);
    Grupa1_3=r(3);
    Grupa1_4=r(4);
    Grupa2_1=r(5);
    Grupa2_2=r(6);
    Grupa2_3=r(7);
    Grupa2_4=r(8);
    Grupa3_1=r(9);
    Grupa3_2=r(10);
    Grupa3_3=r(11);
    Grupa3_4=r(12);
    Grupa4_1=r(13);
    Grupa4_2=r(14);
    Grupa4_3=r(15);
    Grupa4_4=r(16);
    Grupa5_1=r(17);
    Grupa5_2=r(18);
    Grupa5_3=r(19);
    Grupa5_4=r(20);

```

```

sim('Diplom2');
resultTable(i+5,1)=i+5;
resultTable(i+5,2)=a;
resultTable(i+5,3)=tsr;
resultTable(i+5,4)=T;
resultTable(i+5,5)=I;

tabelI(i)=a;
pause(p);
end
clc;
% Визначаємо максимальну енергію
max_table=max(tabelI);
% Визначаємо індекс номера елемента масиву Id2 за якого
значення I енергія
% досягнула найбільшого значення

for i=1:9
    if tabelI(i)==max_table
        Id2(i)
        i_I_max=i
        break;
    end
end
% Зберігаємо значення
I=Id2(i_I_max);

% Проводимо серію дослідів для усіх значень змінної з
масиву Td
for i=1:5

```

```

T=Td(i);
rng shuffle
r=round(randi([0 100],1,20));
Grupa1_1=r(1);
Grupa1_2=r(2);
Grupa1_3=r(3);
Grupa1_4=r(4);
Grupa2_1=r(5);
Grupa2_2=r(6);
Grupa2_3=r(7);
Grupa2_4=r(8);
Grupa3_1=r(9);
Grupa3_2=r(10);
Grupa3_3=r(11);
Grupa3_4=r(12);
Grupa4_1=r(13);
Grupa4_2=r(14);
Grupa4_3=r(15);
Grupa4_4=r(16);
Grupa5_1=r(17);
Grupa5_2=r(18);
Grupa5_3=r(19);
Grupa5_4=r(20);

sim('Diplom2');
resultTable(i+5+length(Id2),1)=i+5+length(Id2);
resultTable(i+5+length(Id2),2)=a;
resultTable(i+5+length(Id2),3)=tsr;
resultTable(i+5+length(Id2),4)=T;
resultTable(i+5+length(Id2),5)=I;

tabelT(i)=a;
pause(p);

```

```

end

% Знаходимо максимальне значення енергії із усіх дослідів
max_table=max(tabelT);

% Визначаємо індекс номера елемента масиву Td за якого
значення T енергія
% досягнула найбільшого значення
for i=1:5
    if tabelT(i)==max_table
        i_T_max=i
        break;
    end
end

% Генеруємо новий діапазон значень Td2 [T_E_max-5
T_E_max+5] з кроком 1
% де T_E_max значення змінної T_E_max при якому енергія
досягнула максимуму
Td2=Td(i_T_max)-5:Td(i_T_max)+5;

% Проводимо дослід для цього діапазону T та визначаємо
енергію сигналу
for i=1:11
    T=Td2(i)
    rng shuffle
    r=round(randi([0 100],1,20));
    Grupa1_1=r(1);
    Grupa1_2=r(2);
    Grupa1_3=r(3);
    Grupa1_4=r(4);
    Grupa2_1=r(5);
    Grupa2_2=r(6);
    Grupa2_3=r(7);
    Grupa2_4=r(8);
    Grupa3_1=r(9);
    Grupa3_2=r(10);

```



```

Grupa3_3=r(11);
Grupa3_4=r(12);
Grupa4_1=r(13);
Grupa4_2=r(14);
Grupa4_3=r(15);
Grupa4_4=r(16);
Grupa5_1=r(17);
Grupa5_2=r(18);
Grupa5_3=r(19);
Grupa5_4=r(20);

sim('Diplom2');
tabelT(i)=a;
resultTable(i+5+length(Id2)+5,1)=i+5+length(Id2)+5;
resultTable(i+5+length(Id2)+5,2)=a;
resultTable(i+5+length(Id2)+5,3)=tsr;
resultTable(i+5+length(Id2)+5,4)=T;
resultTable(i+5+length(Id2)+5,5)=I;

pause(p);
end

% Визначаємо максимальну енергію
max_table=max(tabelT);
% Визначаємо індекс номера елемента масиву Id2 за якого
значення I енергія
% досягнула найбільшого значення

for i=1:11
    if tabelT(i)==max_table
        Td2(i);
        i_T_max=i;
        break;
    end
end

```

```

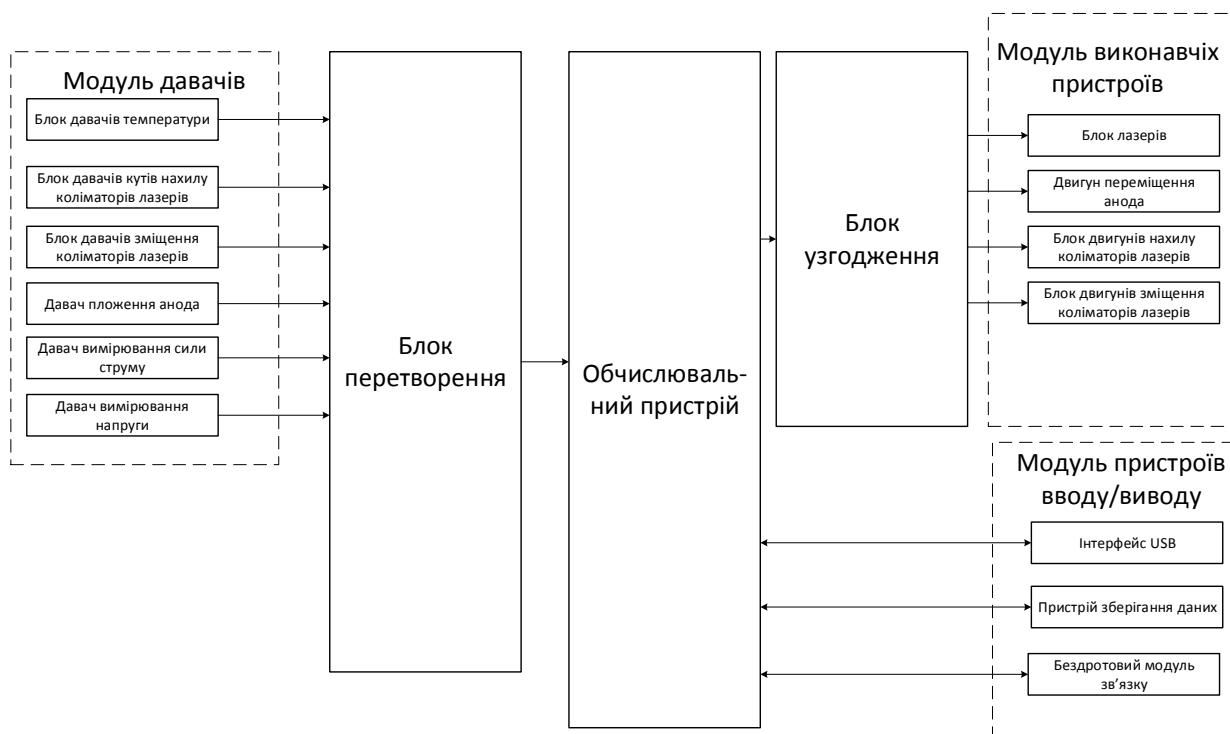
    end
end
% Зберігаємо значення
T=Td2(i_T_max);

clc;
% Виводимо значення T та I
I
T
% Максимальная енергія
tabelT(i_T_max)
% Відсортований ряд енергій
sort([tabelI tabelT])
sortResultTableS={'N','E','tsr','T','I'};
[M,N]=size(resultTable);
sortResultTable=sortrows(resultTable,[-2]);
for i=1:M
    for j=1:N

sortResultTableS{i+1,j}=num2str(sortrows(sortResultTable(i,
j))));
    end
end
end

```

ДОДАТОК Б. Структурна схема



ДОДАТОК В. Публікації

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В
ЕНЕРГЕТИЦІ ІМ. Г.Є. ПУХОВА**



**XXXIX
НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СПЕЦІАЛІСТІВ
ІНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В
ЕНЕРГЕТИЦІ ІМ. Г.Є. ПУХОВА НАН УКРАЇНИ**



Збірник тез конференції
12 травня 2021 р.

Київ – 2021

УДК 621.3 + 004 + 519.6 : 620.9

Рекомендовано до друку Вченою радою
Інституту проблем моделювання в енергетиці
ім. Г.Є. Пухова НАН України
(протокол №7 від 27 травня 2021 р.)

Організаційний комітет:
В.В. Мохор, В.О. Артемчук, С.Ф. Гончар, А.В. Яцишин та ін.

Програмний комітет:
В.В. Мохор, В.О. Артемчук, С.Ф. Гончар, О.О. Попов та ін.

Відповідальні за випуск:
В.О. Артемчук, С.Ф. Гончар

Зб. тез XXXIX науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ, 12 травня 2021 р. / ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2021. – 144 с.

© Автори публікацій, 2021

© Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2021

Д.А. Адаменко, А.В. Писаренко

МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ РОЗРЯДІВ ТА АНАЛІЗУ ОТРИМАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Вступ. Метою даної роботи є розроблення моделі системи керування експериментальною установкою для дослідження високовольтних розрядів, що мають ініціювати фізичні процеси у аноді робочого діода. Результатом таких експериментів є нагрів екранів, що призначені для збору випромінення, яке провокує зміну їх температури. У розроблюваній системі буде виконуватись керування лазерами, та зазором між катодом та анодом.

Розроблювана система призначена для проведення експериментів на установці. Суть експериментів полягає у тому, що потрібно визначити яким чином конфігурації параметрів, які можна задавати або вимірювати, впливають на виділення енергії у навколишнє середовище при пробі діода[1]. Ансамбль з лазерних променів призначений для створення плазми, яка має зробити процес пробою більш контрольованим та забезпечить більшу крутизну переднього та заднього фронту імпульса потужності[2].

Результатами проведених експериментів виступають зафіксовані зміни температури екранів або одного екрану зі значною площею поверхні. Важливою задачею є збір температурних даних, на основі яких буде вираховуватись зібрана енергія.

Основним завданням системи є збір даних про зафіксовану енергію, та пошук залежностей між параметрами експерименту та кількістю енергії, виділення якої було ініційовано пробоем у діоді при вищезгаданих параметрах експерименту[4]. У статті представлена модель, створена у програмному середовищі MATLAB, яка моделює процес отримання температурних даних, підрахунок зібраної енергії, зіставлення зібраної енергії з параметрами експерименту, вибір найбільш вдалих параметрів.

Алгоритм збору та обробки даних

Для створення моделі у MATLAB було обрано тип екранів, які збирають на себе теплову енергію. Для найбільш об'єктивної оцінки виділеної енергії було прийняте рішення встановити металеву сферу навколо діода, з певними вирізами, необхідними для підводу обладнання та забезпечення функціонування діода та лазерів. Таке рішення дозволяє перекрити максимальну площу навколо діода, та враховувати випромінення, що розповсюджуються у всіх напрямках.

Отже, навколо діода встановлено металеву кулю, що поглинає теплову енергію. По «паралелях» кулі встановлені термопари, та для кожної паралелі вираховується середнє арифметичне значення температури. Таким чином з усіх рівнів давачів отримано t_1, t_2, \dots, t_n відповідно. Потім визначається

68

середнє арифметичне значення цих температур, що буде вважатися середньою температурою кулі $t_{с.к.}$. Тоді зібрана енергія дорівнює :

$$E = c \cdot m \cdot (t_{a.s.} - t_{a.s.0}) \quad (1)$$

де :

E – теплова енергія;

c – теплоємність матеріалу кулі;

m – маса кулі.

Параметр l – проміжок між катодом та анодом (проміжок в діоді) – параметр, що автоматично або в ручному режимі змінюється при кожному експерименті для того, аби визначити його оптимальну величину по критерію максимізації зібраної енергії. Вищезгаданий параметр має змінюватись у певному припустимому інтервалі, при чому можливі наступні підходи:

- 1) зміна між верхньою та нижньою межею з певним кроком;
- 2) зміна із застосуванням чисельних методів пошуку оптимуму.

Параметр T – затримка або випередження спрацьовування лазера відносно спрацьовування розрядників. T автоматично або в ручному режимі змінюється при кожному експерименті для того, аби визначити його оптимальну величину по критерію максимізації зібраної енергії. Вищезгаданий параметр має змінюватись у певному припустимому інтервалі, при чому можливі наступні підходи:

- 1) зміна між верхньою та нижньою межею з певним кроком;
- 2) зміна із застосуванням чисельного метода для пошуку оптимуму.

Спочатку встановлюється статичне значення T та проводяться експерименти з пошуку максимального енерговиділення (E) зі зміною l , знаходиться оптимальне l . Отримане значення l фіксується та запускається алгоритм пошуку оптимального T . Як результат – отримується оптимальна комбінація T, l .

Результатом роботи даного алгоритму є таблиця, що автоматично формується та містить у собі такі дані: E, l, T .

У таблиці виконується сортування по значенню E . Таким чином можна буде визначити при яких параметрах вдалось отримати найбільше теплової енергії.

Модель у MATLAB/Simulink

На основі вищеописаного алгоритму було розроблено модель у середовищі Simulink, яка представлена на рис. 1.

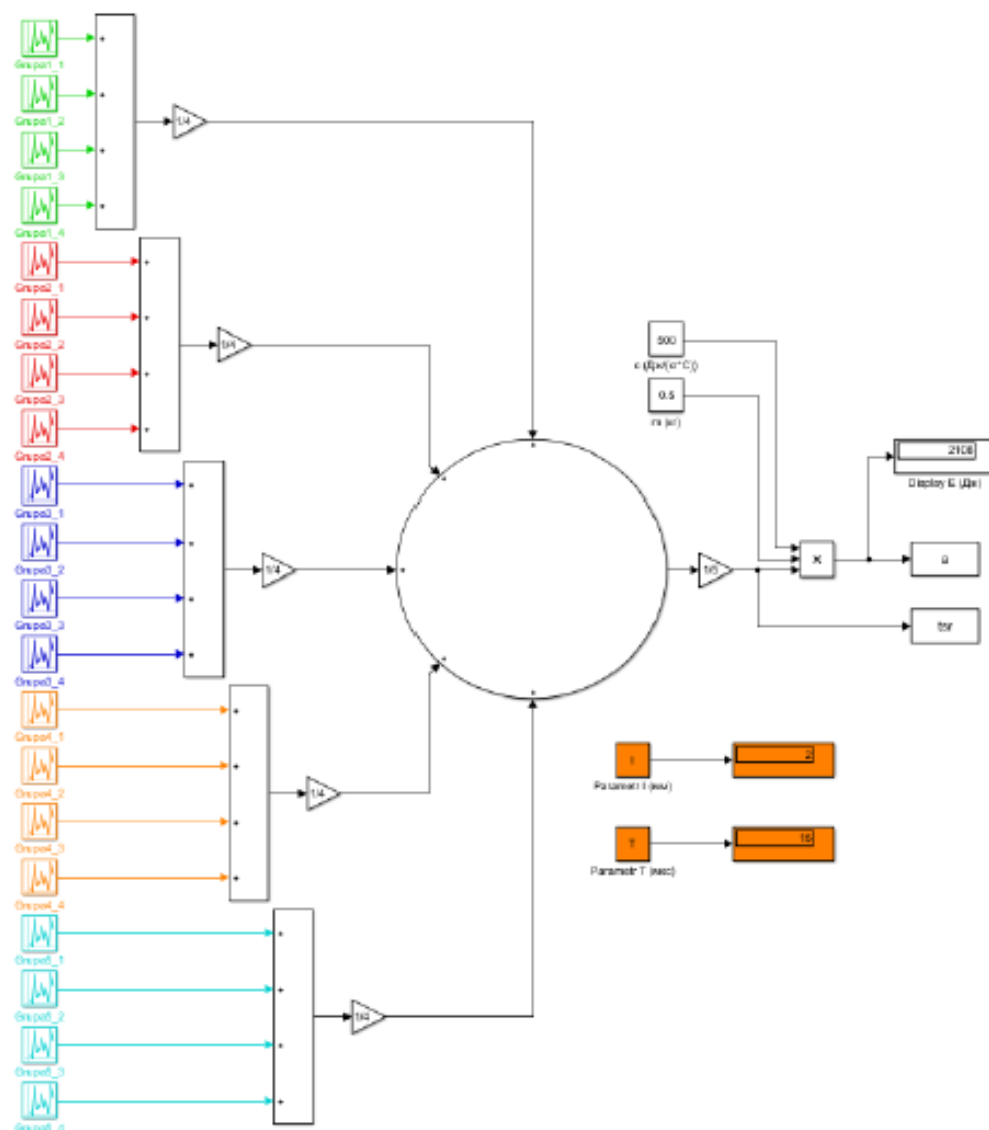


Рис. 1 – Модель у Simulink

Як видно з рис. 1, робота моделі розпочинається з надходження температур з термопар, що повністю співпадає з тим, як працює реальна система. Було створено 5 груп термопар, що розташовуються по п'яти, взаємо паралельним, горизонтальним площинам. «Grup1_1 – Grup1_4» - датчики температури, що розташовані концентрично відносно діода у площині, наближеній до полюса, зі сторони катода. «Grup2_1 – Grup2_4» - датчики температури, що знаходяться на ближчій до зазору та «екватора» сфери площині. «Grup3_1 – Grup3_4» - датчики температури на «екваторі» сфери, знаходяться на рівні зазору діода. «Grup4_1 – Grup4_4» - датчики, що симетричні до «Grup2_1 – Grup2_4». «Grup5_1 – Grup5_4» - датчики

70

температури, що розташовані концентрично відносно діода у площині, наближеній до полюса, зі сторони анода. У процесі моделювання ці температури, а точніше зміна температури, генеруються за допомогою створеного скрипта у MATLAB.

Наступний етап – це надходження змін температур на суматори. Тут відбувається складання змін температур з усіх датчиків однієї групи. Для розрахунку середньої зміни температури сфери – середні зміни температури з усіх груп складаються та діляться на кількість груп. Оскільки товщина стінок сфери рівна – вищезгадана логіка розрахунку її середньої температури є припустимою. Енергія, поглинена сферою, може бути визначена за формулою (1).

В результаті отримана кількість енергії у Джоулях, що була зібрана сферою (рис.2.).

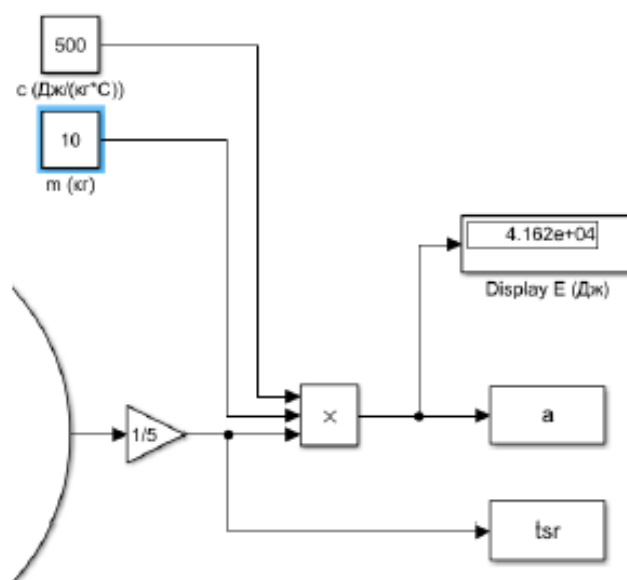


Рис. 2. – Підрахунок зібраної енергії та передача значень у Workspace

За допомогою програмного коду виконується перемикання параметрів установки, таких як зазор (l) та затримка спрацювання лазерів (T). Значення цих величин також відображаються при кожному експерименті (ітерації спрацювання моделі). Відображення цих параметрів показано на рисунку:

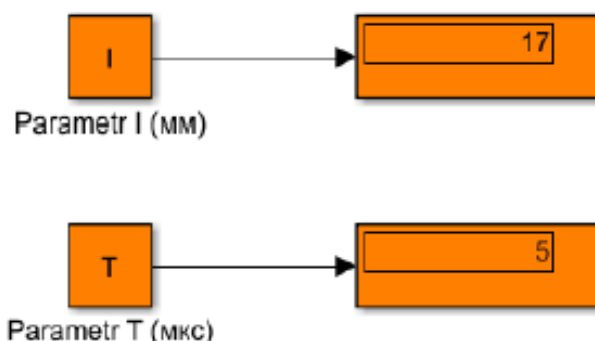


Рис. 3. – Відображення параметрів проведення експерименту

Параметр «I» характеризує зазор між катодом та анодом діода, що має вплив на результат експерименту та цей вплив потрібно зафіксувати та дослідити. Даний параметр, за фізичною моделлю повинен змінюватися в діапазоні від 1мм до 20мм.

Параметр «T» характеризує собою затримку спрацьовування лазерів, відносно замикання конденсаторів, що ініціює пробій діода. Високовольтний розряд відбудеться і без участі лазерів, що опромінюють катод (чи анод), але, як було зазначено раніше, лазерне опромінення металу створюватиме плазму у дослідній камері, що покращуватиме фізичні характеристики пробою діода. Підсвічування лазерами елементів діода є актуальним, як до замикання розрядників, так і після, тому значення затримки спрацьовування лазерів може бути, як від'ємним, так і додатнім.

Проведені експерименти записуються у таблицю зі стовпцями, що містять кількість поглиненої енергії сферою, значення затримки спрацьовування лазера, значення зазору в діоді. Рядки у вищезгаданій таблиці сортуються за значеннями у стовпчику з величинами «E» від більшого до меншого. Таким чином, результатом роботи даної моделі є таблиця, що по порядку показує оптимальні значення «T» та «I» по критерію максимізації енергії, та, власне, значення «E», що відповідає конкретним параметрам експерименту.

	1	2	3	4	5
1	1	4.3199e+04	8.6398	0	20
2	2	3.9100e+04	7.8199	0	15
3	3	4.0875e+04	8.1749	0	10
4	4	4.0303e+04	8.0606	0	5
5	5	4.0899e+04	8.1797	0	1
6	6	4.1979e+04	8.3958	0	16
7	7	4.3791e+04	8.7581	0	17
8	8	3.9774e+04	7.9549	0	18
9	9	4.0773e+04	8.1546	0	19
10	10	4.0650e+04	8.1299	0	20
11	11	4.1915e+04	8.3831	0	21
12	12	4.1817e+04	8.3634	0	22

Рис. 4. – Таблиця з результатами експериментів з наступними стовпцями: номер експерименту, значення енергії, значення середньої температури сфери, значення затримки спрацювання лазерів, значення зазору

Розроблення моделі у пакеті MATLAB

System Identification Toolbox – є одним з додатків MATLAB, що призначений для побудови математичних моделей динамічних систем. Для побудови моделей досліджуваних процесів необхідно задати масиви вхідних та вихідних даних, отриманих з експерименту. Вищезгаданий застосунок розглядає систему, як чорну скриньку, та будує модель спираючись тільки на інформацію про вхід та вихід об'єкта. Це робить даний інструмент зручним та корисним для створення математичних моделей динамічних систем [5].

Набір інструментів Identification Toolbox забезпечує такі методи як максимальна ймовірність, мінімізація похибок передбачення та системна ідентифікація підпростору. Для врахування нелінійної динаміки системи, застосовуються моделі Гаммерштейна-Вінера та нелінійні моделі ARX з нелінійною вейвлетною мережею, моделі з деревовидними розгалуженнями та сигмовидною мережею [3].

Для створення математичної моделі системи керування зазором та лазерами, у System Identification Toolbox було імпортовано дані про залежність отриманої енергії від зазору діода та затримки спрацювання лазерів. Таким чином вхідними змінними системи виступають значення «Т» та «d», а вихідними – значення «Е». Була проведена ідентифікація моделі процесу, що розглядається, за допомогою різних методів з метою пошуку математичної моделі, що найбільш точно відтворює досліджуваний процес. За параметром Best Fits, що відображує близькість математичної моделі реальній системі, було обрано такий метод ідентифікації, що найбільш точно відтворює реальну картину експериментів.

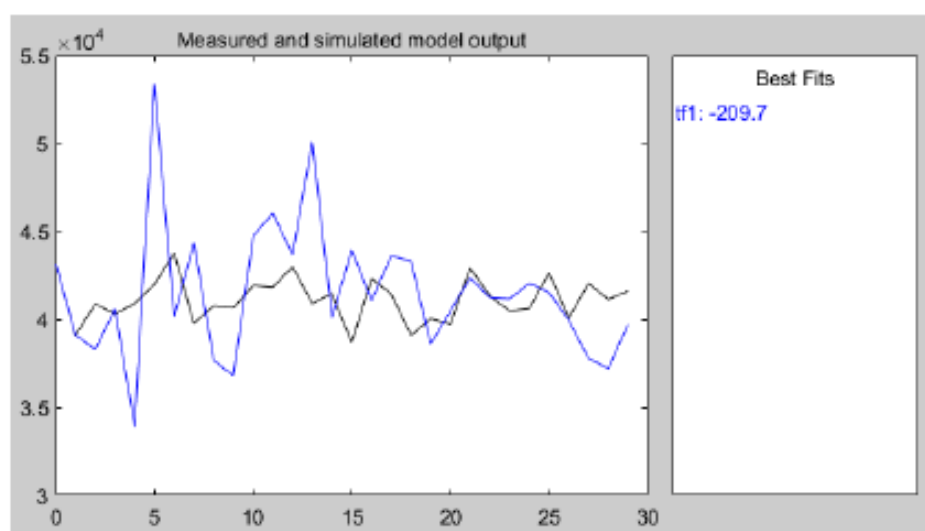


Рис.5. – Transfer function models

На рис.5 зображено порівняння роботи математичної моделі, що побудована методом Transfer function та реальної поведінки системи. З графіків та значення «Best Fits» можна зробити висновок, що побудована математична модель погано імітує поведінку реальної системи.

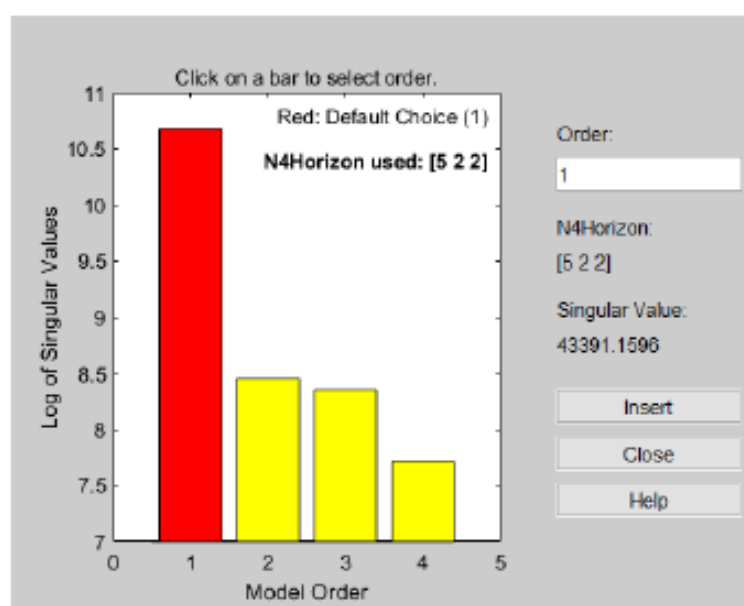


Рис. 6. – Вибір найкращої моделі зі State space models

Наступним типом моделі, що розглядався, є State space models. На рис. 6 зображено процес вибору порядку моделі. Дослідження показали, що збільшення порядку моделі простору станів не суттєво збільшує відповідність реальному процесу.

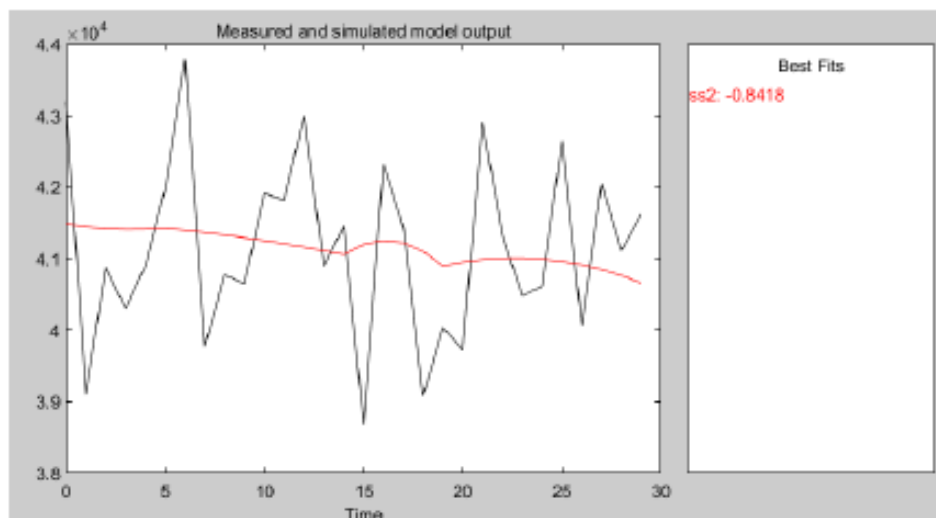


Рис. 7. – State space models

З рис. 7 можна зробити висновки, що модель побудована за допомогою «State space models» не справляється з відтворенням реальних значень експериментів.

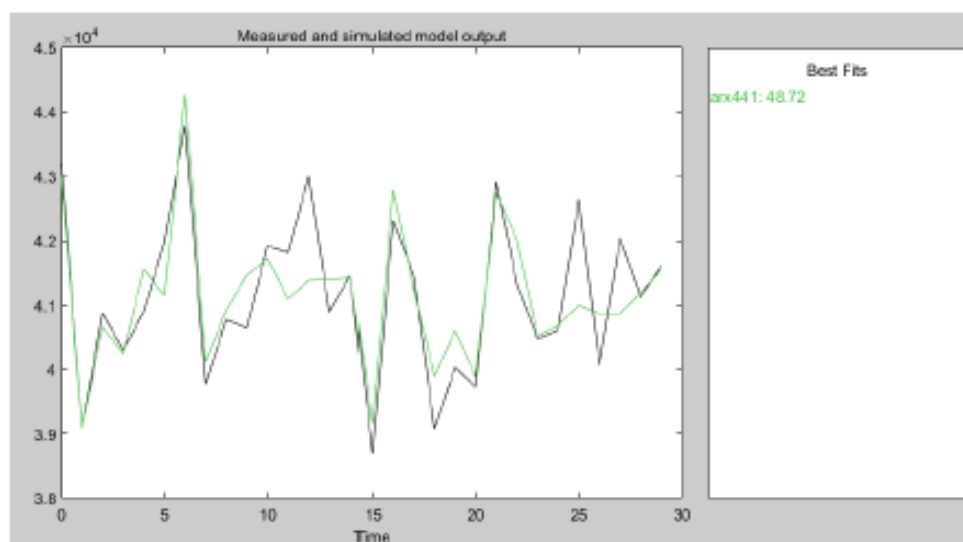


Рис. 8. – Polynomial models

На рис. 8 представлено графіки поведінки математичної моделі, що була створена за допомогою інструменту «Polynomial models». Можна стверджувати, що така модель вже відображає тенденцію поведінки реальної системи з точністю 48.72%.

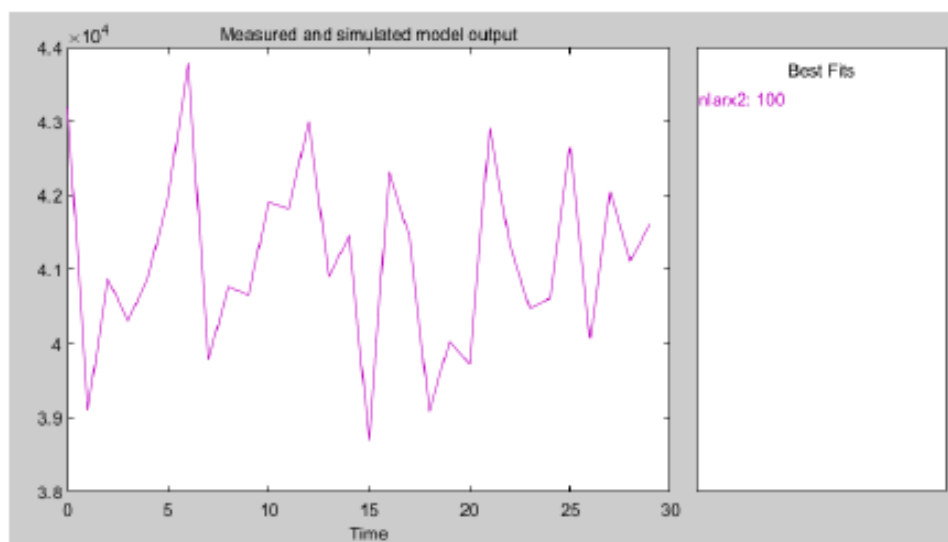


Рис. 9. – Nonlinear models (Sigmond Network)

Найкращий результат у створенні математичної моделі було досягнуто за допомогою «Nonlinear models (Sigmond Network)». Як видно з графіку та значення точності (рис. 9.) – така модель на 100% повторює поведінку системи.

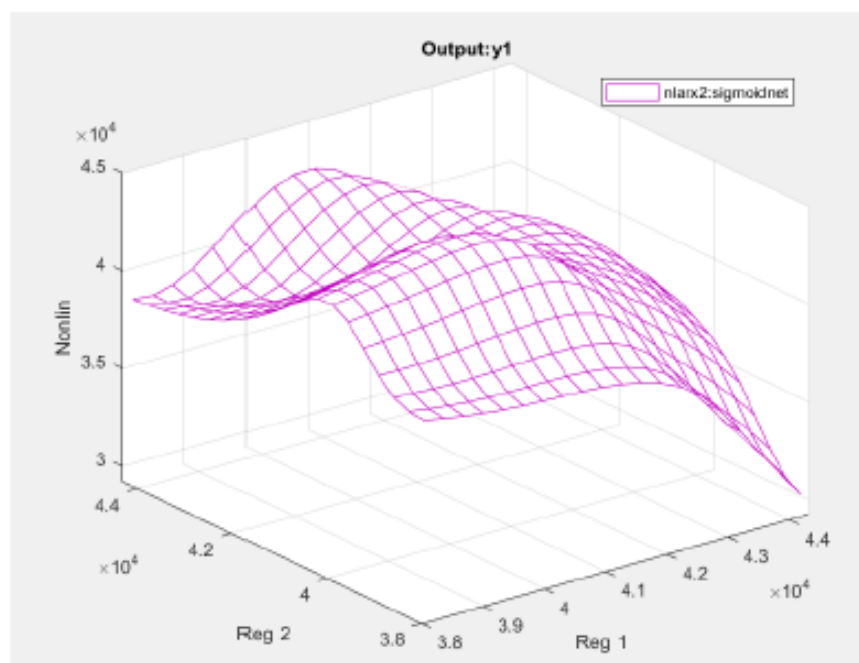


Рис. 10. – Nonlinear ARX model plot

Рис. 10 ілюструє тривимірне представлення моделі, що була створена за допомогою «Nonlinear models (Sigmond Network)».

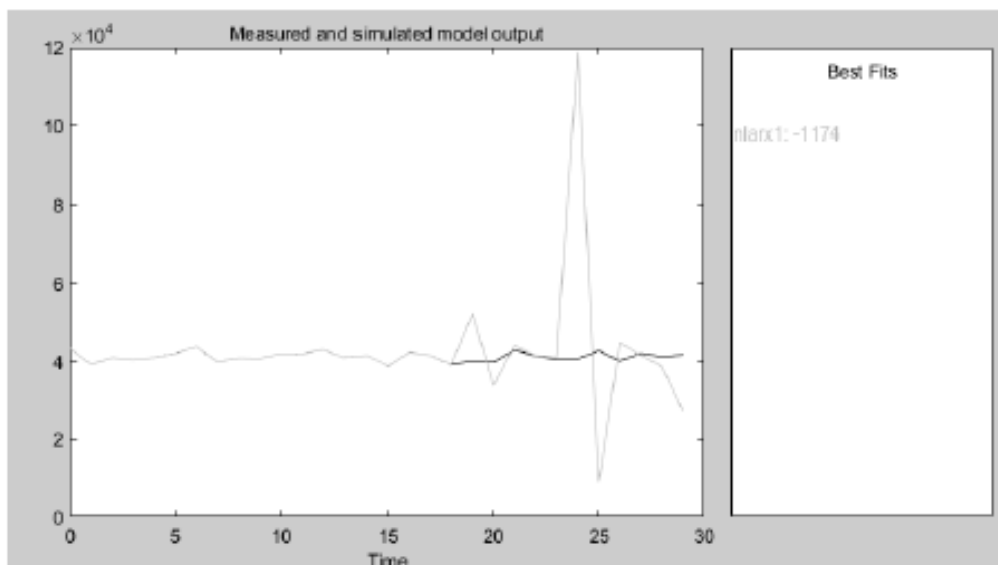


Рис. 11. – Nonlinear models (Wavelet Network)

Математична модель, що створювалась методом «Nonlinear models (Wavelet Network)» - зовсім не відповідає вхідним даним, що підтверджує рис. 11.

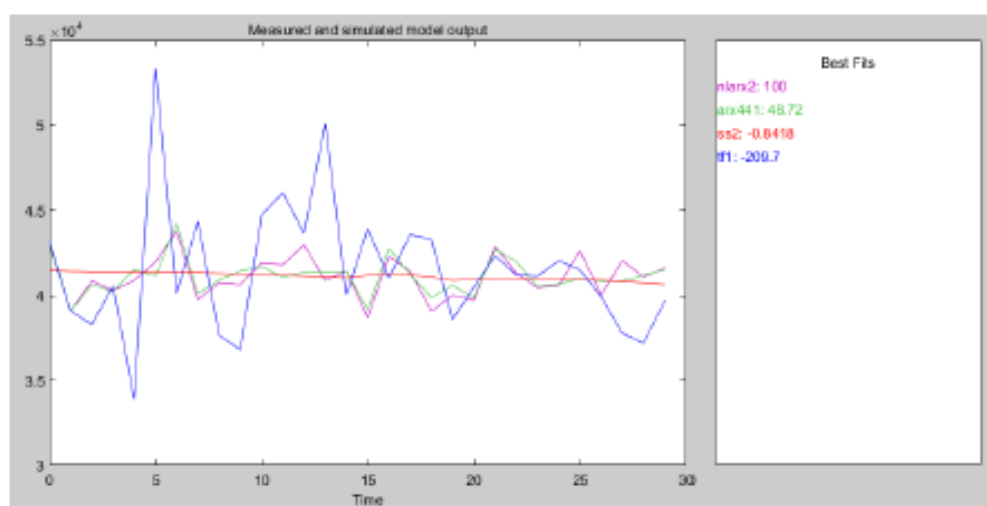


Рис. 12. – Результати моделювання у Identification toolbox

Як видно з графіків – найкраще процес відтворює Polynomial models та Nonlinear models (Wavelet Network). Створені математичні моделі можна перемістити у Simulink, де їх буде зручно використовувати. За допомогою утворених моделей можна виконати відтворення значення енергії для таких значень «I» та «T», які не були протестовані в експериментах.

77

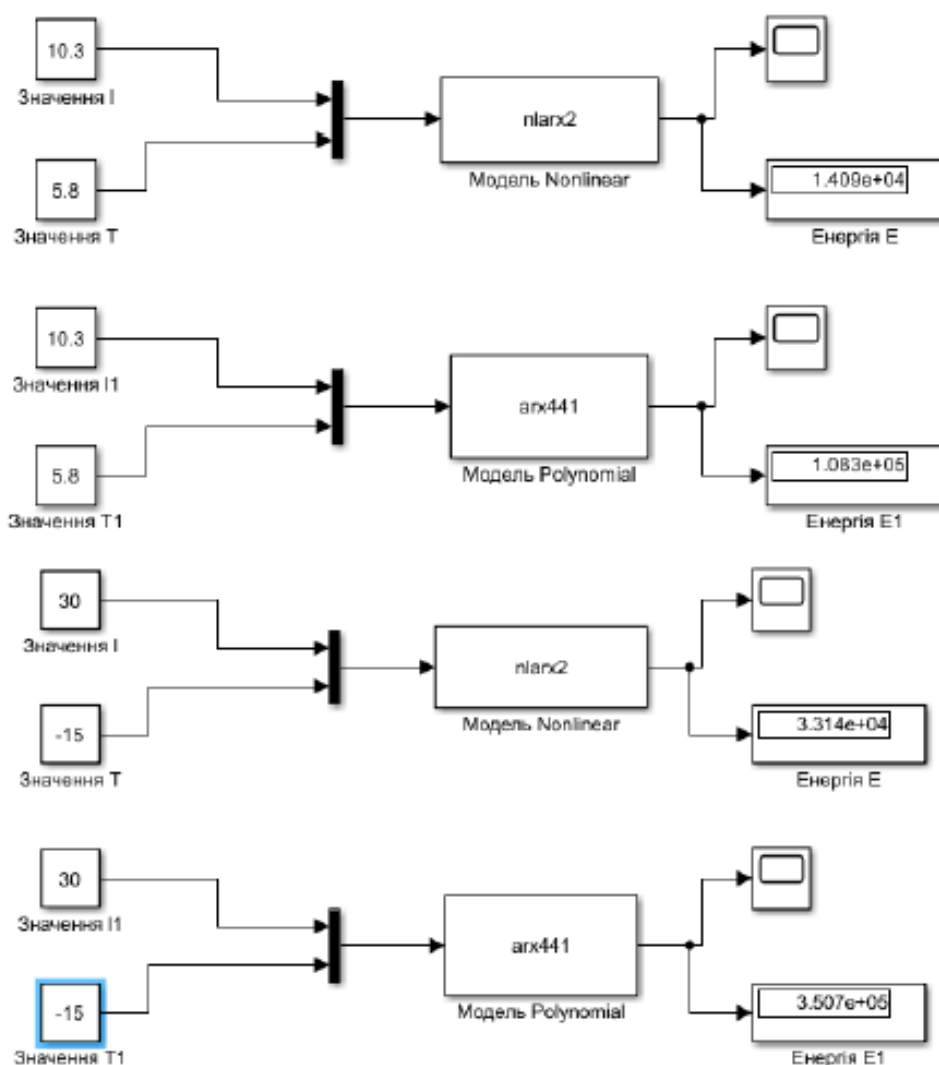


Рис. 13. – Прогнозування значення енергії

Для верифікації отриманих моделей було застосовано вибірку, яка не входила до даних, на основі яких створювалися моделі. Як видно з рис. 13, отримані значення енергії для Polynomial models та Nonlinear models відповідають реальним, що свідчить про адекватність отриманих моделей реальному процесу, що розглядається.

Висновок

Результатом описаної роботи та досліджень – є модель, що імітує реальний експеримент, отримує дані з датчиків. Отримана інформація оброблюється на кожній ітерації за допомогою створеного алгоритму, що дозволяє зменшити кількість експериментів для пошуку найкращого результату. Отримані дані у автоматичному режимі оброблюються таким

чином, що знаходяться найбільш вдалі налаштування по критерію максимізації отриманої енергії. На основі змодельованих експериментальних даних було побудовано математичну модель процесу за допомогою MATLAB/Identification toolbox. Така математична модель дає змогу прогнозувати значення виходу системи (енергії) для подальших досліджень експериментальної установки.

- [1] Controlled Nucleosynthesis / Stanislav Adamenko, Franco Selleri, Alwyn van der Merwe. // Springer Science & Business Media. – 2007. – С. 16–40.
- [2] Factorial Design for Efficient Experimentation: Generating Informative Data for System Identification / Spall, J. C. // IEEE Control Systems Magazine, vol. 30(5) – 2010. – С. 38–53.
- [3] System identification / Torsten Söderström, Stoica P. // New York: Prentice Hall – 1998. – С. 5-8.
- [4] r-Process Nucleosynthesis in Hot Accretion Disk Flows from Black Hole-Neutron Star Mergers / R. Surman, G. C. McLaughlin, M. Ruffert, H.-Th. Janka, W. R. Hix. // The Astrophysical Journal 679. – 2008. – С. 5-30.
- [5] <https://www.mathworks.com/> (дата звернення 28.04.2020).

Система керування експериментальною установкою для дослідження імпульсних високовольтних розрядів

Адаменко Д. А., Писаренко А. В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Київ, Україна

Анотація. Метою даної роботи є опис системи, що має зробити можливими експерименти, які досліджуватимуть вплив певних варіативних параметрів на імпульсні високовольтні розряди. Розроблюваний прототип призначений для зміни параметрів експериментів, автоматичного збору та аналізу отриманих даних.

Ключові слова: термоядерний синтез, діод, зазор, лазер, зафіксована енергія.

Вступ

Розроблювана система буде застосовуватись до **проєкту**, який було розпочато, як наукове дослідження для розв'язання задачі ядерного синтезу з позитивним виходом енергії.

Одним з видів ядерного синтезу є термоядерний синтез, який характерний для зірок. Джерелом енергії горіння зірок є термоядерне згоряння речовини, при якому ядра гідрогену, що є легкими, зливаються та утворюють ядра інших хімічних елементів, що є більш важкими, у ході такої реакції випромінюється вільна енергія.

На Землі вже було відтворено такий процес шляхом підризу водневої бомби, але існує проблема того, що не було винайдено методів для зменшення потужності такого процесу, аби зробити його контрольованим та придатним для використання у сфері енергетики. Наразі науці відомий тільки один метод підпалу речовини для термоядерної реакції – шляхом підризу атомної бомби, яку не можливо зробити малої потужності, через те, що для таких процесів існує поняття критичної маси. З 1951го року розвивається тема керованого термоядерного синтезу, який би дозволив застосовувати процес ядерного горіння для енергетики.[1]

Керований термоядерний синтез – синтез більш важких атомних **ядер** з більш легких з метою отримання енергії, який, на відміну від вибухового термоядерного синтезу, що використовується в термоядерних вибухових пристроях, носить керований характер. Керований термоядерний синтез відрізняється від традиційної ядерної енергетики тим, що в останній використовується реакція розпаду, в ході якої з важких **ядер** виходять більш легкі ядра.

Атомні ядра складаються з двох типів нуклонів – протонів і нейтронів. Їх утримує разом так звана сильна взаємодія. При цьому енергія зв'язку кожного нуклона з іншими залежить від загальної кількості нуклонів в ядрі, як показано на графіку на рис. 1.

З графіка видно, що у легких **ядер** зі збільшенням кількості нуклонів енергія зв'язку зростає, а у важких падає. Якщо додавати нуклони в легкі ядра або видаляти нуклони з важких атомів, то ця різниця в енергії зв'язку буде виділятися у вигляді різниці між витратами на здійснення реакції і кінетичною енергією частинок, що вивільняються. Кінетична енергія (енергія руху) частинок переходить в тепловий рух атомів після зіткнення часток з атомами. Таким чином ядерна енергія проявляється у вигляді нагріву.

Зміна складу ядра називається ядерним перетворенням або ядерною реакцією. Ядерна реакція зі збільшенням кількості нуклонів в ядрі називається термоядерною реакцією або ядерним синтезом. Ядерна реакція зі зменшенням кількості нуклонів в ядрі – ядерним розпадом.

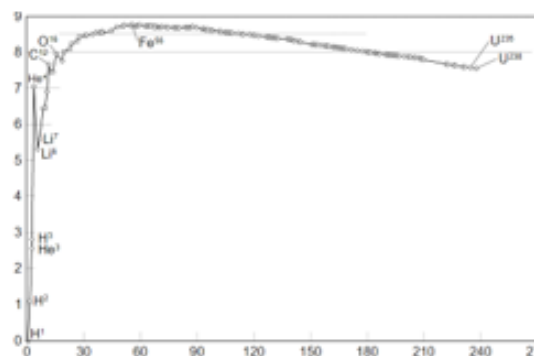


Рис. 1. Залежність енергії зв'язку нуклона (MeV) від числа нуклонів в ядрі

Протони в ядрі мають електричний заряд, а значить, відчують кулонівське відштовхування. В ядрі це відштовхування компенсується сильною взаємодією, що утримує нуклони разом. Але сильна взаємодія має радіус дії набагато менший кулонівського відштовхування. Тому для злиття двох **ядер** в одне потрібно спочатку їх зблизити, долаючи кулонівське відштовхування. Відомо кілька таких способів. У надрах зірок це гравітаційні сили. У прискорювачах – кінетична енергія розігнаних **ядер** або елементарних частинок. В термоядерних реакторах і термоядерній зброї – енергія теплового руху **ядер** атомів. У наш час гравітаційні сили не підконтрольні людині. Прискорення частинок настільки **енергозатратно**, що не має жодних шансів на позитивний енергобаланс. І тільки тепловий метод виглядає

придатним для керованого синтезу з позитивним виходом енергії [2]

Концепція

Розроблювана система призначена для проведення експериментів на установці. Суть експериментів полягає у тому, що потрібно визначити яким чином конфігурації параметрів, які можна задавати або вимірювати, впливають на виділення енергії у навколишнє середовище під час пробою діода. Ансамбль з лазерних променів призначений для створення плазми, яка робить процес пробою більш контрольованим та забезпечує більшу крутизну переднього фронту імпульсу потужності та заднього фронту імпульсу потужності.

На рис.2 показано параметри з одного експерименту без використання лазера:

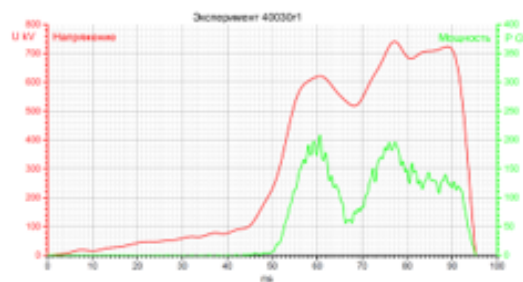


Рис. 2. Дані з осцилографа про експеримент без використання лазера

Точність спрацювання та синхронізації лазерів має вимірюватись ~~наносекундами~~, оскільки з рисунку видно, що мова йде про імпульси, які тривають до 50 ~~наносекунд~~.

Для визначення потужності у блок обчислювальних приладів надходять значення струму та напруги. З точки зору розроблюваної системи, напруга – той параметр, на який впливу не має, оскільки вона залежить від конфігурації розрядників, які не будуть розглядатися у системі керування лазерами, а струм – залежить від багатьох параметрів в діоді, два з них – відстань між катодом і анодом та налаштування лазерів – будуть регулюватись розроблюваною системою.

Основним параметром для визначення оптимального режиму роботи лазерів та зазору між катодом і анодом є температура до якої нагріваються екрани, оскільки саме цей зворотній зв'язок показує кількість виділеної енергії.

Коліматори лазерів будуть розташовуватись концентрично, навколо діода, аби забезпечити рівномірне опромінення катода або анода з усіх сторін.

Оскільки мова йде про експериментальну діяльність – буде тестуватись багато різних варіантів спрацювання та напрямлення лазерів. Для цього коліматори мають бути ручним. Вони повинні переміщуватись вздовж осі катод-анод, та повинні мати можливість змінювати кут нахилу променів відносно осі діода аби можна було тестувати як впливає на якість процесу пробою формування лазерами плазми на катоді або аноді, або і на катоді і на аноді одночасно. Блок керування лазерами повинен мати можливість змикати випромінювання в різні моменти відносно пробою в діоді, що буде регулюватись або затримкою, відносно ініціювання периферією установки процесів, що ініціюють пробій в діоді, або досягненням установленого значення

різниці потенціалів між катодом та анодом. Для зміни зазору діода буде зроблено діод ручним, завдяки електродвигуну. Катод зробити ручним не можливо через особливості конструкції установки.

Опис структурної схеми



Рис. 3. Структурна схема

Блок давачів температури. Датчики з даного блоку будуть розташовані на екранах, що нагріваються від випромінювання. За допомогою цих датчиків буде можливим збір зворотного зв'язку від зміни режиму роботи лазерів та зміни параметрів діода. Ця інформація буде найбільш важливою з усіх вимірів, оскільки вона на пряму свідчить про ефективність основного процесу. Температурні дані будуть збиратись блоком обчислювальних пристроїв для оптимізації налаштувань.

Блок давачів кутів нахилу коліматорів лазерів. Ці датчики потрібні для точного розуміння у яку точку направлено випромінювання з кожного коліматора. Що дозволить зі значною точністю підсвічувати будь-яку точку в діоді для проведення пошуку оптимального сценарію.

Блок давачів зміщення коліматорів лазерів призначений для відслідковування точного положення фіксатора коліматорів, який, за допомогою електродвигуна матиме можливість переміщуватись вздовж осі діода.

Вище згадані давачі положення коліматорів зроблять можливим рух коліматорів вздовж осі діода, а отже, – і вздовж катода та анода, таким чином можна буде забезпечити концентричне підсвічення на будь-якому рівні вищезгаданих елементів та направити промінь під будь-яким кутом до осі. Це дозволить спостерігати, як зародження плазми в певному місці впливає на ефективність процесу.

Давач положення анода. Даний датчик відповідає за надання інформації про те, на якому віддаленні від кінця катода знаходиться кінець анода. Змінюватись це віддалення буде за допомогою електродвигуна, що рухатиме фіксатор анода. За допомогою підсистеми, що забезпечить це зміщення будуть збиратись дані про вплив віддалення на енергетичний вихід експерименту.

Давач вимірювання сили струму та давач вимірювання напруги будуть використовуватись за призначенням для виміру напруги та струму у діоді. Ці дані будуть слугувати основою для підрахунку потужності, яка є важливим параметром для спостереження.

Блок лазерів. У розроблюваній системі для створення плазми використовуються лазери. Промінь з лазерів поділяється дільниками та розводиться оптичними засобами по коліматорам. Лазери використовуються імпульсні, оскільки опромінення має тривати до сотні наносекунд, а вкладає енергія має складати десятки джоулів. Таким чином по колу надходять промені з 6 – 8 коліматорів, кожен з променів, маючи достатню потужність – створюватиме плазму з поверхні матеріалу, на яку він спрямований. Утворена таким чином плазма стимулює пробій діода у потрібний час та при оптимальних умовах, припускається, що згенерована плазма покращить форму імпульсу пробією. Як зазначалося раніше, – бажано досягти якнайбільшої крутизни переднього та заднього фронту імпульсу.

Двигун переміщення аноду виконує функцію збільшення або зменшення відстані між катодом та анодом. Даний двигун працює у поєднанні з давачем зміщення аноду. Ця підсистема надає інформацію про зазор в діоді для проведення аналітики та внесення змін у величину зазору з метою пошуку оптимальної конфігурації.

Блок двигунів для нахилу коліматорів лазерів призначений для того, аби була можливість, при зафіксованій кордації з коліматорами, частину променів направити на один рівень по осі, а іншу частину – на інший рівень, також це надає змогу направляти промені під кутом до поверхні та на торцеві поверхні.

Блок двигунів для зміщення коліматорів лазера. Дані двигуни роблять можливим пересування фіксатора коліматорів вздовж осі діода. Це дозволяє підсвічувати анод або катод в процесі пошуку оптимального вирішення.

У центральному обчислювальному пристрої системи передбачено USB-інтерфейс. За допомогою нього можливо збирати накопиченні дані, статистику, також наявність такого апарату передачі даних дозволяє швидко вносити зміни в алгоритми програми обчислення та збору даних.

Для зручності систему обладнано бездротовим модулем зв'язку для надання можливості спостерігати з різних пристроїв в режимі реального часу за роботою установки. Також такий модуль використовується для керування системою та її налаштування.

Перед центральним обчислювальним пристроєм стоїть задача керувати механізмами та роботою системи таким чином, аби накопичити статистику, яка покаже ту конфігурацію налаштувань, що є найбільш енергоефективною. Головним критерієм ефективності є температура, яку давачі температури зможуть зафіксувати на екранах. Даний пристрій у ручному або автоматичному режимі змінює параметри освітлення елементів діода, відстань між катодом і анодом, вчасно забезпечує лазерне опромінення, піддає давачі, під процес ініціювання пробією в діоді та зберігає та опрацює отримані температурні дані та дані про параметри та форму імпульсу потужності.

АЛГОРИТМ ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ

Навколо діода встановлено металеву кулю, що поглинає випромінювання та теплову енергію. По «паралелі» кулі встановлені термопари, та для кожної паралелі вираховується середнє арифметичне температури. Таким чином з усіх рівнів давачів отримано t_1, t_2, \dots, t_n відповідно. Потім визначається середнє арифметичне цих температур, що буде вважатись середньою температурою кулі $t_{ср}$. Тоді зібрана енергія дорівнює :

$$E = c * m * (t_{ас} - t_{ас0}) , \text{ де}$$

E – теплова енергія;
 c – теплоємність матеріалу кулі;
 m – маса кулі.

Параметр l – проміжок між катодом та анодом (проміжок в діоді) – параметр , що автоматично або в ручному режимі змінюється при кожному експерименті для того, аби визначити його оптимальну величину по критерію максимізації зібраної енергії. Вищезгаданий параметр має змінюватись у певному припустимому інтервалі можливий режим підбору :

1) зміна між верхньою та нижньою межею з певним кроком;
 2) зміна із застосуванням чисельного метода для пошуку оптимуму.

Параметр T – затримка або випередження спрацьовування лазера відносно спрацьовування розрядників. T автоматично або в ручному режимі змінюється при кожному експерименті для того, аби визначити його оптимальну величину по критерію максимізації зібраної енергії. Вищезгаданий параметр має змінюватись у певному припустимому інтервалі можливий режим підбору :

1) зміна між верхньою та нижньою межею з певним кроком;
 2) зміна із застосуванням чисельного метода для пошуку оптимуму.

Спочатку встановлюється статичним T та проводяться експерименти по пошуку максимального енерговиділення (E) зі зміною I , знаходиться оптимальне I . Отримане значення I фіксується та запускається алгоритм пошуку оптимального T . Як результат – отримується оптимальна комбінація T, I .

Результатом роботи даного алгоритму є таблиця, що автоматично формується та містить у собі такі дані: E, I, T, I, U , де:

I – максимум сили струму;

U – максимум напруги.

У таблиці виконується сортування по значенню E . Таким чином можна буде визначити при яких параметрах вдалось отримати найбільше теплової енергії.

Висновки

У даній статті було описано ідею створення системи керування роботою лазерного обладнання, що має за мету

покращити роботу експериментальної установки. Розраховується, що розроблена система зробить можливим автоматичний збір даних, крім того, за допомогою алгоритму, буде виконуватись певне керування роботою лазерів на основі зібраних результатів експериментів, що зробить можливим пришвидшити пошук оптимальних налаштувань для кожної з конфігурацій, що застосовуються.

ЛІТЕРАТУРА

1. Controlled Nucleosynthesis / Stanislav Adamenko, Franco Selli, Alwyn van der Merwe. // Springer Science & Business Media. – 2007. – С. 16–40.
2. r-Process Nucleosynthesis in Hot Accretion Disk Flows from Black Hole-Neutron Star Mergers / R. Surman, G. C. McLaughlin, M. Ruffert, H.-Th. Janka, W. R. Hix. // The Astrophysical Journal 679. – 2008. – С. 5–30.

Control system of experimental setup for pulsed high-voltage discharges research

Adamenko D. A., Pysarenko A. V.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute»
Kyiv, Ukraine

Abstract. The purpose of this work is to describe a system that should make possible experiments that will investigate the effect of certain variable parameters on pulsed high-voltage discharges. The developed prototype is designed to change the parameters of experiments, automatic collection and analysis of the obtained data.

Keywords: thermonuclear fusion, diode, gap, lasers, measured energy.